

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Aeroespacial  
Aeropuertos y Transporte Aéreo

Ensayos de compresión diagonal y  
compresión simple sobre mampostería de  
adobe

Autor: Francisco Garrocho López

Tutor: Mario Solís Muñiz

Departamento de Mecánica de Medios Continuos y  
Teoría de Estructuras  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017







Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Aeroespacial  
Aeropuertos y Transporte Aéreo

# **Ensayos de compresión diagonal y compresión simple sobre mampostería de adobe**

Autor:  
Francisco Garrocho López

Tutor:  
Mario Solís Muñiz  
Profesor Contratado Doctor

Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Trabajo Fin de Grado: Ensayos de compresión diagonal y compresión simple sobre mampostería de adobe

Autor: Francisco Garrocho López  
Tutor: Mario Solís Muñiz

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:



# Agradecimientos

---

A todos aquellos compañeros, profesores y amigos que me han apoyado en estos cuatro años de grado y me han ayudado a convertir este trabajo en una realidad.

A Mario, por brindarme esta oportunidad y haber depositado su confianza y su tiempo en mí para llevar a cabo este trabajo.

A José, por ser un maestro y un referente durante la elaboración de este trabajo.

A Emilio, por su dedicación, su ímpetu de trabajo y sus inacabables ganas de ayudar.

A Fran, por ser un referente en lo personal y en lo académico: sin su ayuda nada hubiera sido posible. Gracias por tanto.

A mis padres y a mi hermano, por ser siempre el apoyo necesario e incondicional durante estos últimos cuatro años.

Muchas gracias

*Francisco Garrocho López  
Sevilla, 2017*



# Resumen

---

Las construcciones en tierra, bajo las que viven un tercio de la población mundial, poseen una gran cantidad de ventajas que las convierten en construcciones ampliamente utilizadas. Principalmente destacan la sencillez de su fabricación, su bajo coste, la accesibilidad de sus materias primas o sus buenos resultados como aislante térmico o acústico.

Es comprensible entonces que el uso de este tipo de construcciones se encuentre más extendido en países menos desarrollados, donde otros materiales industriales más resistentes, como el acero o los nuevos materiales compuestos, aún son económicamente inaccesibles para la mayoría de la población.

Es por ello que cualquier investigación dedicada a las construcciones de tierra posee una especial connotación social que motiva a la cooperación y al desarrollo por y para estas zonas del planeta, dada la vulnerabilidad de estas construcciones. Además, supone un incentivo para acrecentar la implantación de estas construcciones en países ya desarrollados acostumbrados a otros materiales, en los que las construcciones en tierra han sufrido un injusto descrédito pasando a considerarse como materiales arcaicos.

Este trabajo se define como objetivo principal aportar conocimiento al estudio del comportamiento mecánico del material adobe, típicamente usado en edificaciones con tierra, pero no por ello inmejorable.

Para lograr este objetivo, a lo largo del mismo, se ha realizado una campaña experimental de ensayos de compresión simple, compresión diagonal y tracción indirecta sobre probetas cúbicas, muros a escala y probetas cilíndricas respectivamente, para analizar experimentalmente el comportamiento del material. A partir de estos ensayos se han obtenido importantes características del material como las curvas tensión-deformación, el módulo de rigidez o la tensión de tracción.





# Abstract

---

Rammed earth constructions, which shape a living place for thirty percent of world population, have a great deal of benefits that convert them in widely used constructions. Mostly they highlight by their easy production, low price, availability of the materials and good results as acoustic and thermal insulator.

These qualities help us understand why this kind of constructions are mostly located in underdeveloped countries where other industrial materials, like steel or composite, materials are not still affordable for most population.

That is why any research dedicated to rammed earth constructions has a social special meaning that helps the cooperation and the development in these regions of our planet due to the sensitivity of these constructions. Moreover, it stands for a stimulus to developed countries that are used to another kind of materials where these rammed earth constructions are supposed to be old-world.

The purposes of this project is to promote to the knowledge of the mechanical behaviour of adobe material, typically used in rammed earth constructions but with many betterments.

To reach that goal, during this project we have done an experimental test campaign concerning simple compression, diagonal compression and splitting tests to cubic adobe specimens, adobe walls and adobe cylindrical specimens and we have experimentally analyzed their behavior. From these tests we have achieved some relevant results from the material like curves stress-strain, tensile stress or modulus of rigidity.



# Índice Abreviado

---

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice Abreviado</i>	VII
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos del presente trabajo	1
1.2 Adobe	2
1.3 Antecedentes sobre la investigación acerca del adobe	5
1.4 Composición y elaboración de la mampostería del adobe	5
<b>2 Preparación de los ensayos</b>	<b>9</b>
2.1 Descripción de los ensayos	9
2.2 Calibración de los sensores	10
2.3 Fabricación y preparación del utillaje	13
2.4 Normativa de referencia	23
<b>3 Ejecución de los ensayos</b>	<b>25</b>
3.1 Descripción de la maquinaria empleada	27
3.2 Resultados de los ensayos	30
<b>4 Análisis de los resultados</b>	<b>43</b>
4.1 Análisis de los ensayos	43
4.2 Comparación de las propiedades asociadas a la tipología del ensayos	56
<b>5 Conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>61</b>
<b>Anexo A</b>	<b>63</b>
<b>Anexo B</b>	<b>76</b>
<i>Índice de Figuras</i>	79
<i>Índice de Tablas</i>	83
<i>Bibliografía</i>	85



# Índice

---

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice Abreviado</i>	VII
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos del presente trabajo	1
1.2 Adobe	2
1.2.1 Importancia social	2
1.2.2 Historia y patrimonio	3
1.3 Antecedentes sobre la investigación acerca del adobe	5
1.4 Composición y elaboración de la mampostería del adobe	5
1.4.1 Selección de tierras	6
1.4.2 Elaboración de los bloques de adobe	6
1.4.3 Confección de la mampostería de adobe	7
<b>2 Preparación de los ensayos</b>	<b>9</b>
2.1 Descripción de los ensayos	9
2.2 Calibración de los sensores	10
2.3 Fabricación y preparación del utillaje	13
2.3.1 Utillaje de transporte	13
2.3.2 Utillaje de medición	18
2.3.3 Utillaje de protección	20
2.3.4 Utillaje de aplicación de carga	21
2.4 Normativa de referencia	23
2.4.1 Normativa relativa a ensayos de probetas cúbicas	23
2.4.2 Normativa relativa a ensayos brasileños	23
2.4.3 Normativa relativa a ensayos de muretes	24
<b>3 Ejecución de los ensayos</b>	<b>25</b>
3.1 Descripción de la maquinaria empleada	27
3.1.1 Pórtico de carga principal	27
3.1.2 Máquina universal de ensayos	28
3.1.3 Prensa hidráulica	29
3.2 Resultados de los ensayos	30
3.2.1 Ensayos de compresión simple sobre probetas cúbicas	30
3.2.2 Ensayos de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas	34
3.2.3 Ensayos de compresión diagonal sobre muretes	37
<b>4 Análisis de los resultados</b>	<b>43</b>
4.1 Análisis de los ensayos	43
4.1.1 Análisis de los ensayos de compresión simple sobre probetas cúbicas	43
4.1.2 Análisis de los ensayos de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas	47

4.1.3	Análisis de los ensayos de compresión diagonal sobre muretes	49
4.2	Comparación de las propiedades asociadas a la tipología del ensayos	56
4.2.1	Valores para los ensayos de compresión simple sobre probetas cúbicas.	56
4.2.2	Valores para los ensayos de tracción indirecta sobre cilindros.	58
4.2.3	Valores para los ensayos de compresión diagonal sobre muretes.	59
<b>5</b>	<b>Conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>61</b>
	<b>Anexo A</b>	<b>63</b>
	<b>Anexo B</b>	<b>76</b>
	<i>Índice de Figuras</i>	79
	<i>Índice de Tablas</i>	83
	<i>Bibliografía</i>	85

# 1 Introducción

---

*"La mejor manera de empezar algo es dejar de hablar de ello y empezar a hacerlo" Walt Disney*

## 1.1 Objetivos del presente trabajo

El adobe es un material que, si bien se utiliza fundamental en países menos desarrollados económicamente, está viviendo un auge en países ya desarrollados dada sus propiedades de responsabilidad medioambiental y facilidad de fabricación. Es por ello, que los estudios e investigaciones para caracterizar mecánicamente el material son cada vez más comunes, puesto que, aunque es un material utilizado desde la Antigüedad, su comportamiento no ha sido caracterizado al mismo nivel que otros materiales de construcción más recientemente desarrollados en la historia, como pueden ser el hormigón o el acero. Logrado este objetivo, se podrán mejorar las técnicas de construcción y garantizar la integridad de estructuras fabricadas en adobe de modo que posean, por ejemplo, mejor comportamiento ante los sismos.

El objetivo fundamental de este trabajo fin de grado es caracterizar mecánicamente el adobe como material de construcción frente a cargas de compresión diagonal y compresión simple. Este trabajo se enmarca dentro de la línea de investigación del profesor contratado Doctor Mario Solís Muñiz y busca complementar la tesis doctoral de D. José Daniel Rodríguez Mariscal, que versará sobre la modelización numérica del comportamiento estructural de la mampostería de adobe, de ahí que la campaña experimental se haya desarrollado en conjunto.

Dicha campaña experimental se ha basado en los ensayos de tres tipos de probetas: una tipo murete con un total de ocho especímenes, otra tipo cubo con hasta diez unidades y otra tipo cilindro con un total de trece unidades ensayadas, ocho de ellas ya confeccionadas gracias a un trabajo de fin de grado previo y las cuatro restantes elaboradas durante la propia campaña de ensayos (lo que se denominará lote especial). Los muretes han sido sometidos a esfuerzos de compresión diagonal, las probetas cúbicas a esfuerzos de compresión simple y con las probetas cilíndricas se han ejecutado ensayos de tracción indirecta. Si bien en el primer caso se ha buscado caracterizar el material frente a ese tipo de esfuerzo en concreto, en el segundo caso se ha aplicado el mismo tipo de esfuerzo que ya se hiciera en un trabajo previo para comprobar el efecto del paso del tiempo sobre el material.

Con estos ensayos se persigue obtener, para las probetas de ensayo, algunas propiedades del material como:

- Módulo de elasticidad,  $E$ .
- Resistencia a compresión simple,  $f_{ck}$ .
- Deformación pico,  $\varepsilon$ .
- Tensión de tracción indirecta,  $\sigma_I$ .
- Resistencia de cortante,  $\tau_{max}$ .
- Deformación a cortante,  $\gamma$ .
- Módulo de rigidez,  $G$ .
- Curvas tensión-deformación.

Una de las particularidades de este trabajo se halla en las probetas: éstas han sido elaboradas de manera artesanal exclusivamente para estos ensayos con tierras extraídas en la propia provincia de Sevilla. Esto permitirá comparar los resultados de las probetas fabricadas con tierra sevillana con los resultados de otros autores con otras probetas realizadas con tierra de otras características distintas.

## 1.2 Adobe

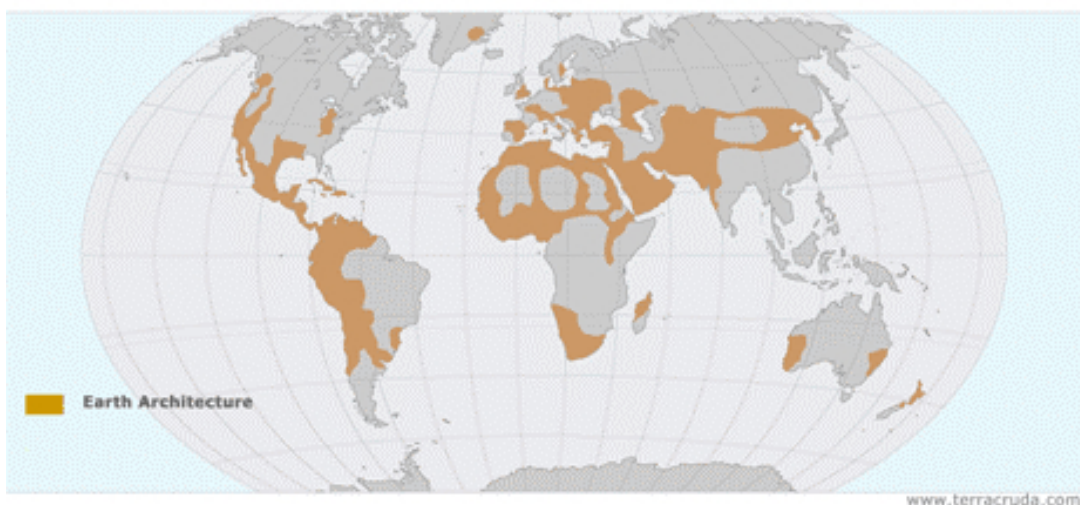
La utilización de la tierra cruda como material de construcción es un hecho del que se tiene constancia desde los mismos comienzos de la humanidad. Si bien el material siguió siendo fundamentalmente el mismo, el paso de los siglos no fue en balde y el hombre comenzó a mezclar la tierra cruda con fibras naturales, como la paja, obteniendo así un material compuesto, más apto para su utilización en edificaciones. Desde aquel momento y hasta la fecha, la tierra ha sido usada como material en las construcciones del hombre, dadas sus numerosas características tanto en el proceso de fabricación, con la facilidad de adquisición, puesta en obra y maleabilidad, como con posterioridad, con su gran capacidad de aislamiento tanto acústico como térmico.

Si nos referimos a los datos, podemos comprobar que se trata de un material de actualidad, ya que el 30 % de la población mundial vive en construcciones de tierra [20] [16]. En algunas regiones del planeta desarrolladas, como son Francia o Australia, esta cifra representa el 15 % o 25 % respectivamente de las viviendas del país en algunas regiones, en contra de la imperante idea de que se trata de un material en completo desuso que gobierna nuestra sociedad.

El adobe es una de entre todas las diferentes técnicas de construcción con tierra cruda, como puedan ser el tapial, la quinchá, los bloques de tierra comprimida (BTC) o la cob. La construcción con adobe consiste en crear bloques macizos compuestos de arena, arcilla, paja y barro que se dejan secar al sol y después se unirá mediante un mortero para crear las construcciones. Es precisamente esta cualidad de ser diseñado a partir de bloques lo que lo convierte en un material anisótropo debido a que durante el proceso de secado, simplemente por la acción de la fuerza de la gravedad la humedad del material tiende a depositarse en las zonas inferiores, lo que provoca que el material pierda parte de su capacidad resistente, tal y como demuestran diversos autores en sus estudios [20] [18]. Por lo tanto, no es aconsejable construir con adobe en zonas con clima húmedo o alta densidad pluviométrica. Junto con las ya mencionadas propiedades de aislante térmico y acústico, las propiedades de bajo coste económico y buen comportamiento medioambiental lo convierten en un material atractivo.

### 1.2.1 Importancia social

Según mencionamos anteriormente, el fácil acceso al material y su bajo coste, hacen que la tierra cruda como material de construcción y, en concreto, el adobe como una de sus técnicas más usadas sean muy utilizados en zonas del planeta especialmente vulnerables económicamente [22]. Actualmente la construcción de adobe se encuentra muy difundida en casi toda América, África y en algunas zonas de Asia, según se muestra en la figura 1.1.



**Figura 1.1** Zonas del planeta donde dominan las construcciones en adobe.



Ésta es una de las claves de su elevada importancia social: si no fuera por la tierra cruda o el adobe, muchas regiones del mundo, desde los anales de la historia y hasta la actualidad, no podrían haber desarrollado construcciones o viviendas, algunas de las cuales perduran hasta nuestros días. Es pues, el empleo de la tierra cruda, una técnica constructiva que enlaza con las tradiciones locales antiguas de prácticamente todos los lugares del mundo en donde se sigue empleando en la actualidad. La expansión mundial del uso de tierra cruda en la construcción, aparte de las áreas geográficas mencionadas anteriormente, abarca también otras zonas como Australia o Groenlandia.

A pesar de toda la importancia de la tierra cruda en la sociedad actual, su estudio e investigación sigue siendo poco rentable para las grandes compañías constructoras del mundo, por lo que son trabajos como el presente o investigaciones como las llevadas a cabo por la Pontifica Universidad Católica de Perú [10], las cuales se han convertido en un referente mundial, las que ayudan a poner en valor a la tierra cruda como material de construcción en la sociedad actual y concienciar de la importancia de conocer el material para mejorar la calidad de las construcciones que aún hoy en día se siguen haciendo en muchos lugares del mundo y así mejorar la calidad de vida las personas que viven bajo ellas.

### 1.2.2 Historia y patrimonio

Existen multitud de ejemplos de construcción con adobe en muy diversas partes del mundo a lo largo de la historia. Citaremos aquí solo algunos ejemplos.

Algunas de las más antiguas ciudades del neolítico del oriente medio ya utilizaban la tierra cruda como elemento constructivo. Entre ellas cabe citar Çatal Huyuk, ciudad que se encontraba en la península de Anatolia y que contaba con un tipo de urbanismo particular compuesto por casas fabricadas con adobe apiñadas unas con otras sin dejar espacios que conformaran calles.

En otras ciudades de oriente medio donde se originaron las primeras civilizaciones con escritura conocidas, también se utilizó el adobe como material de construcción. Ciudades como Ur, Uruk, Kish, Lagash, asentadas junto o cerca de grandes ríos donde abundan las arcillas y la arena, utilizaron con profusión este material. Muchos de las pirámides mesopotámicas de épocas antiguas contaban con adobe en su estructura interna siendo el recubrimiento externo de ladrillo.



**Figura 1.2** Zigurat o pirámide de la antigua Mesopotamia. Irán.

También en España y en el norte de África está documentado el uso de la tierra cruda como elemento constructivo desde la más remota antigüedad. Asimismo, un importante porcentaje de iglesias, murallas y otras edificaciones singulares de España que han llegado hasta nuestras fechas están contruidos con este material. Edificios tan importantes como la Alhambra de Granada, figura 1.3, o ciudades como el centro histórico de Córdoba en Andalucía o Daroca en Aragón son importantes muestras de arquitectura con tierra cruda.



**Figura 1.3** Alhambra de Granada. Andalucía. España.

En el norte de África, destacaremos por su gran belleza, las Kashbah, ciudades fortalezas construidas en tapial y en adobe que hoy se pueden ver en Marruecos. Muchas de estas Kasbahs se encuentran aún hoy en día en pie. Cabe citar también en África, la magnífica ciudad de Tombuctú, construida también en adobe, en las cercanías del río Níger en Malí.



**Figura 1.4** Kasbah. Rabat. Marruecos.

Con la llegada de los españoles a América también llevaron consigo la costumbre de construir con tierra cruda. Sin embargo esta técnica constructiva ya había sido empleada por los nativos americanos desde mucho antes de la llegada de cualquier europeo. En ese sentido destacan los yacimientos arqueológicos prehispánicos de Paquimé y la cultura denominada Casa Grandes en Chihuahua (México) que utilizaban los adobes y el tapial. También los llamados Anasazi o indios pueblo, en el sur de los actuales Estados Unidos, utilizaban un tipo de adobe llamado localmente, y también en México, con el nombre de “jacal”. En América del sur también existía el empleo de la tierra cruda como elemento constructivo desde tiempos prehispánicos. Cabe citar al respecto la ciudad de Chan Chan en Perú, hermosa ciudad construida con este material y que se muestra a continuación en la figura 1.5.





Figura 1.5 Chan Chan. Perú.

### 1.3 Antecedentes sobre la investigación acerca del adobe

El número de investigaciones sobre el adobe está creciendo paulatinamente en el mundo de la ciencia y la ingeniería gracias al renacido interés de aprovechar este material para construcciones de manera que se pueda edificar de forma medioambientalmente más responsable. Muestra de ello son los estudios de la Universidad de Génova, la Universidad de Oporto o la Pontífica Universidad Católica de Perú.

En concreto, en la Universidad de Sevilla y más específicamente en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería, es la línea de investigación dirigida por el profesor contratado Doctor Mario Solís Muñiz la que estudia el comportamiento del adobe y a raíz de la cual se han tutelado, además del presente trabajo, los proyectos de fin de carrera de Miguel Romero [14], Sergio Astorga [13] y Gonzalo Montoya [?], junto con el trabajo de fin de grado de Javier Gómez [15].

De esta línea de investigación se han obtenido estudios sobre el análisis numérico del comportamiento a flexión o ante cargas cíclicas de la mampostería de adobe reforzado con geomalla, que recubre las construcciones aportando mayor ductilidad y resistencia al conjunto. Éstos últimos se realizaron en colaboración con la Pontífica Universidad Católica de Perú.

También se han obtenido resultados para la caracterización experimental del comportamiento del adobe frente a cargas de compresión simple gracias, en parte, a la colaboración de la asociación sin ánimo de lucro dedicada a la bioconstrucción TAPH-TAPH, en las personas de Jorge Moya, Arturo Jiménez y Juan Javier Usero, quienes ayudaron efusivamente en todo el proceso de fabricación de las probetas que se utilizaron para aquella investigación así como para el presente trabajo.

La realización cada año de los *Ciclos de conferencias: la tierra como material de construcción* emprendidos por el profesor Mario Solís es otra prueba fehaciente de que la tierra cruda está muy presente en las investigaciones que en la actualidad se llevan a cabo en la Universidad de Sevilla. Estas jornadas reúnen tanto a expertos en la materia, como ingenieros, arquitectos o científicos, como a aficionados y personas interesadas en la temática, para intercambiar opiniones, conocimientos y avances, con el objetivo común de poner en valor a la tierra como material de construcción.

### 1.4 Composición y elaboración de la mampostería del adobe

El adobe se compone según se expuso anteriormente de una mezcla de arenas (entre un 55 % y un 75 %), finos (entre un 25 % y un 45 %), tanto limos como arcillas, paja y agua. Es importante que la mezcla no posea materia orgánica y que la fibra orgánica, en este caso paja, se escoja cuidadosamente ya que limita las variaciones de volumen que se producen en el adobe durante el proceso de secado.

La relación arcilla-arena del suelo es de gran importancia para el adobe debido a que, si no hay suficiente arcilla en la mezcla, no se conseguirá la cohesión necesaria de todas las partículas y se desmorona. Por el contrario, si no hay suficiente arena, el ladrillo se fisura por retracción de la arcilla durante el proceso de secado [17].

Procedemos ahora a describir el proceso de elaboración específico de los adobes que se utilizaron para la fabricación de las probetas que se han empleado en la elaboración de las mamposterías de adobe que han sido sometidas a la campaña de ensayos.

Todo este proceso de composición y elaboración de la mampostería de adobe que nos disponemos a describir fue dirigido por miembros de la asociación TAPH-TAPH, quienes aportaron su conocimiento y experiencia para obtener unos resultados satisfactorios.

#### **1.4.1 Selección de tierras**

El proceso de selección de tierras debe comprender tanto pruebas de campo como pruebas de laboratorio que se conjuguen de forma secuencial. Las pruebas de campo, las cuales son realizadas in-situ y permiten conocer la calidad del material, son algunas como el método de la bolita, el método del rollo o el método de la botella. Además existe una serie de prueba organolépticas que ayudan a distinguir las características del suelo, como son la prueba del olor, la mordedura, el color o el tacto.

Las pruebas de laboratorio suceden a las de campo, con el objetivo principal de estudiar la granulometría del material mediante tamizado y sedimentación, además de estudiar el índice de plasticidad, el límite líquido y el límite plástico de la muestra. Si bien la granulometría óptima ya se comentó al principio de esta sección, cabe mencionar que para la mezcla de adobe, es conveniente utilizar suelos con bajo índice de plasticidad, puesto que cuanto mayor sea, mayor será la cantidad de agua contenida en la masa que lo convierte en moldeable, y una vez seco, se tendrán mayores retracciones [6]. También es recomendable que los suelos utilizados para elaborar adobe presenten un límite líquido entre 20 y 40, un límite plástico inferior a 20 y que no contengan restos orgánicos como se citó anteriormente [23]. En España, el análisis granulométrico está estandarizado mediante la norma UNE 103101:1995 [2], la determinación del límite líquido (ensayo de Casagrande) por la UNE 103103:1995 [3] y la determinación del límite plástico por la UNE 103104:1993 [4].

Así pues, el objetivo era conseguir unas tierras que, además de encontrarse en alguna explotación cercana al lugar de trabajo en la provincia de Sevilla, cumpliera con las siguientes características:

- Mínima variación de la dosificación de la granulometría.
- Tamaño máximo de árido menor de 5 mm.
- Límites plástico y líquido dentro de los rangos recomendados.

#### **1.4.2 Elaboración de los bloques de adobe**

La muestra de tierras seleccionadas poseía las siguientes características:

- 60 % contenido en arenas.
- 40 % contenido en finos.
- Tamaño máximo de árido de 5 mm sólo superado por el 1 % de la muestra, por lo que se decidió no tamizarla.
- Límite plástico 23,1.
- Límite líquido 17,2.

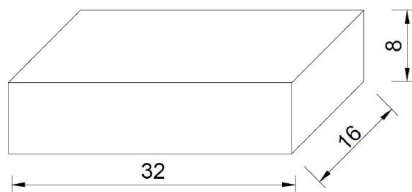
A estas tierras se le añadió un 1 % en peso de la mezcla total de paja, consiguiendo así un peso específico de  $19 \text{ kN/m}^3$  y una cantidad de agua equivalente al 30 % en peso de la muestra total.

Una vez finalizado el proceso de dosificación de las tierras, se procedió a la confección de los bloques de adobe. Se comenzó mezclando la tierra y la arena para conseguir la dosificación adecuada, para posteriormente añadir las fibras de paja con un tamaño máximo de cinco centímetros de longitud, así como el agua.

Tras encontrar una superficie que impidiese el desborde la mezcla, se procedió a verter todos los materiales sobre ella, y se mezclaron con los pies hasta que la masa quedase uniforme y se dejó reposar el adobe durante veinticuatro horas.

Para la elaboración de los bloques fue necesario disponer de un molde de madera que actuase como encofrado, el cual debe encontrarse húmedo para evitar que la mezcla se quede adherida a las paredes del mismo. Este molde (320x160x80 mm) debe ser rellenado con bolas de material lanzadas con fuerza para que

el material quede lo más compacto posible, después se enrasa y se retira el molde. Posteriormente, se dejó reposar el material durante casi un mes, tal y como remienda la norma ASTM E519, protegidos de la lluvia y de costado para que el secado sea más efectivo[19]. Todo ello en condiciones de temperatura (entre 15°C y 25°C) y humedad relativa (en torno al 50 %) de laboratorio.



**Figura 1.6** Dimensiones teóricas de una unidad de adobe en centímetros.

Para la elaboración de los muretes fueron necesarias veintidós unidades y media. También se elaboraron probetas cúbicas para ensayos de compresión simple y cilíndricas para ejecutar ensayos de tracción indirecta: las primeras se obtuvieron a partir de cortar con una sierra radial eléctrica las unidades de adobe con las dimensiones descritas anteriormente; las segundas se obtuvieron directamente con unos moldes específicos.

Las dimensiones para los bloques se han tomado según las recomendaciones de la Norma Peruana E.080 [1], la cual indica:

- Para adobes rectangulares, el largo será aproximadamente el doble del ancho.
- La relación entre el largo y la altura debe ser del orden de cuatro a uno.
- La altura debe ser mayor de ocho centímetros.
- La altura de la junta no debe ser mayor de dos centímetros.

En total se elaboraron dos lotes, con la obtención de 500 bloques de adobe en total, de manera que sobraran algunos bloques para someterlos a ensayos de compresión simple sin juntas y conocer el comportamiento del material sin la presencia de juntas. En la elaboración del segundo lote se dispuso de mayor experiencia y se aplicó para una mejor confección de las probetas y para utilizar una paja de tamaño menor, obteniendo de esta manera unas probetas de mayor calidad y con posibles diferencias en cuanto al comportamiento mecánico. También se elaboraron algunas probetas cilíndricas y cúbicas con el objetivo de realizar algún ensayo brasileño o de tracción indirecta en fechas futuras.

#### 1.4.3 Confección de la mampostería de adobe

Una vez finalizado el proceso de secado de los bloques de adobe se procedió fabricar los especímenes para la campaña de ensayos. La mampostería a ensayar se compone de:

- **Muretes.** Ensayados a compresión diagonal, con unas dimensiones teóricas de 83cmx84cm, es decir, prácticamente cuadrados para minimizar los efectos de excentricidad de la carga. Se dispone en total de ocho especímenes.
- **Probetas cúbicas.** Ensayadas a compresión simple con más de un año de secado, para poder así comparar los resultados con otros especímenes con menos tiempo de secado. Se dispone de un total de diez unidades.
- **Probetas cilíndricas.** Se utilizarán para realizar ensayos de tracción indirecta, también conocidos como ensayos brasileños. Se dispone de un total de trece especímenes.

Para el corte de las medias unidades, los prismas rectangulares y los cubos se utilizó una sierra circular eléctrica.

Una vez definida la distribución de los bloques se pasó a calcular el volumen teórico aproximado de mortero que sería necesario para fabricar los especímenes. La dosificación del mismo es idéntica a la de los bloques y una vez mezclados los componentes, se dejó secar durante veinticuatro horas. Una vez pasado dicho tiempo y justo antes de empezar a utilizar el mortero como aglomerante se utilizó un batidor mezclador eléctrico para homogeneizarlo, aunque esta tarea se dividió a lo largo de tres días puesto que se consideró

conveniente no levantar más de tres niveles de bloques de adobe al día por si se producía una compresión excesiva de las juntas.

Durante todo el proceso de fabricación de los especímenes y para tener una evidencia de la correcta colocación de los bloques se fue comprobando regularmente las recomendaciones de la norma peruana E.080 [1] y la colocación plana y paralela de las filas de bloques con un nivel.

El método de ejecución de cada bloque fue humedecer la cara del mismo que iba a entrar en contacto con el mortero para así aumentar su adherencia. Todo el proceso de construcción de los muros y las probetas cúbicas y cilíndricas se llevó a cabo entre el 26 de abril y el 6 de mayo de 2016 [15].

## 2 Preparación de los ensayos

---

*"Estamos aquí para dar un mordisco al Universo. Si no, ¿para qué otra cosa podemos estar aquí?" Steve Jobs*

El proceso de preparación de la campaña de ensayos que se llevó a cabo para la elaboración del presente trabajo comenzó en el mes de febrero y finalizó a mediados del mes de marzo del presente año, 2017. Este proceso ha consistido en la puesta a punto de todo el utillaje para los ensayos que se han llevado a cabo en la campaña experimental.

### 2.1 Descripción de los ensayos

Los distintos tipos de ensayos que se han llevado a cabo durante la campaña de ensayos asociadas a la elaboración de este trabajo son los siguientes:

- **Ensayos de compresión diagonal sobre muretes.**

Utilizando bloques individuales fabricados en moldes de dimensiones 80x160x320 mm se han construido ocho muretes, los cuales poseen un total de nueve filas, cada una de ellas con dos unidades y media en cada fila, lo que se traduce en unas dimensiones teóricas aproximadas, considerando las juntas de mortero, de 840x830x160 mm.



**Figura 2.1** Probeta en forma de murete.

- **Ensayos de compresión simple sobre probetas cúbicas.**

Utilizando las mismas unidades de adobe descritas anteriormente se han cortado los bloques individuales para obtener probetas más pequeñas con dimensiones reales aproximadas de 80x80x80 mm. Estos ensayos han contado con cinco unidades ensayadas con la carga aplicada en dirección paralela a la dirección de secado (ensayos en dirección longitudinal), y otras cinco unidades ensayadas en la dirección perpendicular a la dirección de secado (ensayos en dirección transversal).



**Figura 2.2** Probeta cúbica.

- **Ensayos de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas.**

Este ensayo, realizado sobre trece probetas cilíndricas de 150 mm y 100 mm de diámetro, pretende determinar la resistencia a tracción indirecta sometiendo las probetas a una carga de compresión sobre dos generatrices opuestas. Finalmente, la fuerza de tracción perpendicular provoca que la probeta se rompa por tracción.



**Figura 2.3** Probeta cilíndrica.

## 2.2 Calibración de los sensores

Para obtener de los ensayos unos resultados fiables, se debe poder cuantificar los desplazamientos de los especímenes con suficiente precisión, para lo cual se requiere de una serie de sensores de desplazamiento. En la tabla 2.1 se detallan los sensores que se han utilizado durante la campaña para los ensayos de muretes, ya que en los ensayos de compresión simple y tracción indirecta se hizo uso de los propios sensores de la máquina.



**Tabla 2.1** Inventario de sensores utilizados durante la campaña de ensayos.

Número de sensor	Tipo de sensor	Rango del sensor
S2	HBM	20,0 mm
S3	LVDT	1" = 25,4 mm
S4	HBM	20,0 mm
S5	LVDT	1" = 25,4 mm
S6	Potenciómetro	780,0 mm
S7	Potenciómetro	780,0 mm
S8	LVDT	0,5" = 12,7 mm
S9	LVDT	2" = 50,8 mm
S10	LVDT	0,5" = 12,7 mm
S11	LVDT	4" = 101,6 mm

Si bien la propia máquina que realiza el ensayo podría proporcionarnos información sobre los desplazamientos, la precisión que aporta no es suficientemente buena como para tomar dichos valores como apropiados en algunas zonas de la probeta como por ejemplo en las caras, donde los desplazamientos llegan a ser muy distintos que entre los puntos en los que la máquina mide los desplazamientos. Dicho de otra forma, hay que tener muy en cuenta las enormes dimensiones de las probetas con las que se ha trabajado en los ensayos de compresión diagonal para trabajar con la precisión necesaria acorde a dichas dimensiones. De lo contrario se podrían producir algunos fenómenos, como la flexión, y no ser identificados.

Conocido el desplazamiento de los puntos de la probeta y el valor de la fuerza en todo momento que, en este caso sí aporta la propia máquina de carga, se podrá obtener las curvas fuerza-desplazamiento en los puntos en los que se ha considerado apropiado tomar medidas.

En la medida de lo posible, se ejecutaron los ensayos con transductores de desplazamientos. Los transductores que se utilizaron son LVDT (Transformador Diferencial de Variación Lineal), HBM y potenciómetros. Los primeros son de tipo inductivo con resorte, los HBM's son también inductivos sin resorte y los potenciómetros son de tipo resistivo.

Estos sensores de desplazamientos mandan una señal en forma de diferencia de voltaje a medida que una varilla que llevan en su interior se va desplazando para que, posteriormente, un software informático, en nuestro caso *LabView*, transforme esa diferencia de potencial en desplazamientos.

Para ello es necesario obtener el valor de la pendiente que relaciona la diferencia de potencial con el desplazamiento de cada uno de los sensores. Este valor puede tomarse del propio fabricante o, como es nuestro caso, calcularla con nuestros propios medios y así ratificar que, el dato del fabricante, es un valor adecuado. Este fue el proceso seguido con el LVDT *Sangamo* de rango 4" y con los dos potenciómetros, ya que el resto de sensores estaban calibrados de una campaña de ensayos pasada.

La calibración se realizó con ayuda de un calibre digital fijo. Se anotaron valores del desplazamiento parcial y de la diferencia de potencial asociada a ese desplazamiento de una serie de puntos.

Con los resultados obtenidos se procedió a realizar una recta de regresión lineal por ajuste de mínimos cuadrados.

$$y = ax + b$$

donde,

$$a = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - (\sum x_i)(\sum x_i y_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

Una vez obtenidos los coeficientes que definen las diferentes rectas de regresión, nos cercioraremos de la calidad del modelo a través del coeficiente de determinación. Este coeficiente, que varía entre cero y uno, se aproxima más a uno cuanto más preciso es el resultado obtenido.

$$r^2 = 1 - \frac{\sum(ax_i + b - y_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2}$$

Los datos para la calibración del sensor LVDT *Sangamo* se muestran en la tabla 2.2. Del mismo modo, la recta de calibración obtenida se presenta en la tabla 2.3.

**Tabla 2.2** Valores de calibración para el sensor LVDT *Sangamo*.

Longitud (mm)	Voltaje (V)
2.00	-9.77
2.04	-9.38
5.21	-8.77
15.63	-6.72
25.18	-4.81
37.15	-2.42
48.67	-0.15
54.91	1.09
63.55	2.80
78.00	5.74
82.17	6.57
88.30	7.80
94.08	8.94
97.06	9.50
99.65	10.00

**Tabla 2.3** Recta de regresión obtenida.

Recta de regresión
$y = 0.199 \cdot x$

El siguiente paso fue decidir la colocación de los sensores en cada una de las caras, A y P, de la probeta. En primer lugar, se decidió repartir el mismo número de sensores en cada cara para poder comparar cada resultado obtenido con su equivalente en la cara contrario. Luego, se decidieron colocar dos sensores en posición horizontal y otros dos en posición vertical para cada cara, pues se consideró necesario analizar los desplazamientos en ambas direcciones. Por último se colocaron los sensores centrados en función de su rango y del desplazamiento previsto para cada posición, considerando como hipótesis de partida que los desplazamientos en dirección horizontal serían mayores que en dirección vertical. A modo de resumen, se presenta en la tabla 2.4 como se repartieron los ocho sensores LVDT y HBM sobre las dos caras de los muretes.

Los dos potenciómetros se colocaron anclados a las dos esquinas del murete paralelas al suelo, es decir, sobre las esquinas sobre las que no se aplicó la carga. De esta manera se consiguió estimar también qué sucede en puntos alejados del centro de la probeta con respecto a los desplazamientos y las deformaciones.

Todos los sensores que se colocaron sobre las caras de las probetas, es decir, los LVDT y los HBM se conectaron a una caja de conexiones, figura 2.4, especialmente diseñada para esta campaña de ensayos de manera que se simplificara la labor de identificación y conexión de los sensores.

**Tabla 2.4** Posición de los sensores sobre las caras del muretes.

Sensor	Posición	Cara	Longitud
2	Vertical	Cara A	Corto
3	Vertical	Cara A	Largo
4	Vertical	Cara P	Corto
5	Vertical	Cara P	Largo
8	Horizontal	Cara A	Corto
9	Horizontal	Cara A	Largo
10	Horizontal	Cara P	Corto
11	Horizontal	Cara P	Largo

**Figura 2.4** Caja de conexiones para los sensores LVDT.

## 2.3 Fabricación y preparación del utillaje

### 2.3.1 Utillaje de transporte

Para realizar un correcto transporte de las probetas en el que éstas se vieran sometidas al mínimo desgaste posible, se han utilizado una serie de elementos, algunos de los cuales fueron fabricados en una campaña de ensayos anterior y otros se han fabricado específicamente para esta campaña. Destacar que estos elementos se han utilizado únicamente para los muretes puesto que, con las probetas cúbicas y cilíndricas, debido a su pequeño tamaño, no se consideró necesario utilizar ningún elemento de utillaje.

El sistema de transporte, que es muestra en la figura 2.5, está conformado por cuatro varillas roscadas de un diámetro de veinte milímetros para mantener el murete comprimido durante su transporte junto con sus respectivos cuatro ángulos (figura 2.6) con un cabezal de encaje para dichas varillas. Éstos se fabricaron a partir de la soldadura de unos perfiles comerciales en L de sesenta milímetros de ala. Esta dimensión estaba restringida por las indicaciones de la norma de Nuevo México NMX-C-464-ONNCCE-2010 [24], según la cual, el útil sobre el que se aplica la carga debe tener una dimensión inferior al canto de un bloque, ochenta milímetros en nuestro caso. De esta manera, con el apoyo de unas eslingas y la utilización del puente grúa que se encuentra en el mismo laboratorio, se pudieron desplazar los especímenes desde el lugar en el que estaban almacenados hasta el pórtico principal de carga donde se ejecutarían los ensayos de forma rápida y cómoda.



**Figura 2.5** Útiles para el transporte de los muretes y su colocación en posición diagonal.



**Figura 2.6** Sistema de sujeción de los muretes.

A partir del segundo ensayo, tras obtener unos resultados insatisfactorios del primer ensayo debido a una posible mala aplicación de la carga, se decidió cambiar el método de transporte y se empezaron a realizar cortes en dos de las esquinas de los muretes (dos esquinas opuestas) para aplicar la carga sobre una superficie mayor, y se comenzó a utilizar un solo par de varillas roscadas de veinte milímetros de diámetro y de ángulos para las esquinas. De esta forma y, de nuevo, con ayuda de unas eslingas, se colocaba el murete sobre el perfil en I directamente en el pórtico de carga para aplicarle la carga.





**Figura 2.7** Labores de corte de los muros.

Para el corte de las esquinas de los muretes que se muestra en la figura 2.7, los cuales se realizaron a la altura de la segunda fila de adobes con un ángulo de  $45^\circ$  para conseguir un área de aplicación de la carga suficientemente grande, se utilizaron unos serruchos y se cortaron de forma manual. Tras comprobar que este método, además de lento, dañaba las herramientas debido a que el material es muy destructivo se procedió a utilizar una amoladora junto con un taladro para cortar las esquinas. Se obtuvieron resultados más precisos y rápidos.



**Figura 2.8** Transporte con traspaleta manual.

Para el transporte de los muretes desde el lugar de almacenamiento hasta un punto intermedio para su preparación previa al ensayo se usó una traspaleta manual, según se muestra en la figura 2.8.

Con el muro en posición horizontal, se colocan las barras de acero y los angulares de las esquinas y con la ayuda de unas eslingas y del puente grúa se consigue colocar el murete encima de la viga de acero con perfil en I sobre la que se realizará el ensayo. Ver figura 2.9.



**Figura 2.9** Colocación sobre la viga con ayuda de eslingas.

De nuevo con la ayuda de unas eslingas (figura 2.10), esta vez atadas en la esquina opuesta, se consigue colocar el muro en posición diagonal.



**Figura 2.10** Volteo sobre la viga para la colocación en posición diagonal.

A la vez que el muro voltea para colocarse en posición diagonal, se prepara yeso y se aplica sobre la base del muro según muestra la figura 2.11, en el perfil de acero, para aportar estabilidad y homogeneidad en el reparto de la carga.



**Figura 2.11** Aplicación de yeso es la base.

Por último, con la ayuda de unos sargentos y unas eslingas, se acerca la viga con perfil en I y se centra en el pórtico de carga para la correcta aplicación de la carga tal y como se muestra en la figura 2.12.



**Figura 2.12** Centrado de la viga con la ayuda de eslingas.



Una vez realizado el ensayo, se utiliza la traspaleta manual para transportar los bloques en los que ha quedado dividido la probeta para su almacenaje y posterior reciclaje, como se aprecia en la figura 2.13.



**Figura 2.13** Retirada de los restos del ensayo con ayuda de traspaleta manual.

### 2.3.2 Utillaje de medición

Según comentamos en el punto anterior, los sensores descritos se han utilizado en los ensayos de muretes, puesto que para las probetas cúbicas y cilíndricas se utilizó el propio sensor de la máquina. Es por ello que la información a continuación descrita sólo se aplica a los ensayos de compresión diagonal sobre muretes.

Para fijar los sensores a los especímenes y así medir los desplazamiento relativos se utilizaron unas abrazaderas metálicas para los tubos rígidos y unas pletinas en forma de L de aluminio con un pequeño orificio pasante para la varilla que lleva el sensor en una cara (en el caso de los sensores en posición horizontal) y con otro orificio para poder atornillarla al murete. Después de intentarlo con algunos aglomerantes como el yeso, la silicona o la cola blanca, se comprobó que éste era el método más sencillo y fiable de fijar los sensores a la probeta sin dañarla. Destacar que las pletinas que se utilizaron para los sensores HBM, según se muestran en la figura 2.14, son más largas para compensar que las varillas que estos sensores usan son más cortas. Es decir, la distancia del punto de anclaje de la pletina hasta la zona de apoyo del sensor es mayor.

Todas las varillas de aluminio que usan los sensores llevan un cabezal que es propio de cada sensor. Estas varillas se cortaron a medida de cada sensor, se midió su rango de trabajo, el cual se marcó sobre la propia varilla y se limó (ver figura 2.15), y además se colocó la varilla con respecto al sensor según si el desplazamiento esperado es de acortamiento o alargamiento para obtener unos resultados lógicos posteriormente.

En algunos casos y debido a que las varillas de algunos sensores verticales intersecaban con otras varillas horizontales se utilizaron unos tornillos más largos a través de unas tuercas, para separar los sensores del muro. En la figura 2.16 se muestran dichos tornillos y tuercas.

Además, para adherir las varillas a dichas pletinas y así evitar desplazamientos relativos se utilizó un pegamento de unión, en concreto el adhesivo rápido de dos componentes X60.

Todos los ensayos fueron filmados por una cámara de vídeo y retratados por dos cámaras de fotografía colocadas de manera que se apreciaran correctamente las deformaciones que se producirían en ambas caras.

En colaboración con el profesor Víctor Jesús Compan Cardiel de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad de Sevilla, se llevó a cabo un modelado en 3D de las probetas que se sometieron a ensayo. Para ello, utilizando unas referencias sobre el suelo o sobre la propia probeta, se realizaron fotografías





**Figura 2.14** Sistema de colocación de los sensores al murete. Sensores LVDT, HBM, abrazaderas, pletinas y varillas.



**Figura 2.15** Zona de la varilla que trabaja en rango limada.



**Figura 2.16** Sistema para evitar que las varillas choquen en el muro.

alrededor de las probetas. Con esta información y gracias a la utilización de un software pudimos obtener información del muro, como sus dimensiones exactas o su volumen.

### 2.3.3 Utillaje de protección

En los ensayos de tracción indirecta se utilizó una pequeña caja sobre la base de la máquina para proteger a la probeta de posibles caídas que se muestra en la figura 2.17.



**Figura 2.17** Caja de protección.

En los ensayos de compresión diagonal, para proteger a los sensores de fuertes impactos una vez que el espécimen rompe, éstos fueron asegurados mediante unos hilos de nylon anudados a sus abrazaderas, y fijadas a la viga del pórtico de carga que se utilizó para realizar los ensayos. Ver figura 2.18.



**Figura 2.18** Sistema de protección para los sensores.

Del mismo modo se protegieron los potenciómetros de posibles golpes del muro sobre ellos mismos con un utillaje de acero que además permitiera el paso del cable del propio potenciómetro. Asimismo se ancló el potenciómetro a la viga que soporta al murete con una pinzas y todo el conjunto con un sargento para garantizar su estabilidad durante el ensayo, tal y como se muestra en la imagen 2.19.





**Figura 2.19** Protección para el potenciómetro.

Tras la realización del primer ensayo se decidió dejar colocadas unas cuñas de madera encima de los potenciómetros con una doble función: proteger a los potenciómetros de posibles golpes y proteger al muro en caso de que se desequilibrara durante la aplicación de la carga en el ensayo. Estas cuñas aparecen en la ilustración 2.5 de este mismo capítulo, en la descripción de los útiles de transporte. Los resultados fueron satisfactorios y el utillaje de acero para proteger a los potenciómetros fue innecesario a partir de ese momento.

#### 2.3.4 Utillaje de aplicación de carga

Para los ensayos brasileños se utilizaron unas piezas de acero de forma triangular que se adaptan a la arista del cilindro para conseguir una aplicación de la carga lo más uniforme posible. Además, entre esta pieza y la propia probeta se colocaron unas tiras de neopreno, progresivamente más estrechas cuanto más cerca estaban de la probeta, para ayudar en dicha misión, según se aprecia en la imagen 2.20.



**Figura 2.20** Útil aplicación de la carga en ensayos brasileños.

Para los ensayos de compresión diagonal, con el fin de repartir la carga del pórtico lo más homogéneamente posible sobre el murete, se fabricó un útil de acero (figura 2.21) con la forma precisa para que encajase sobre

los angulares colocados en las esquinas del mismo.



**Figura 2.21** Útil sobre el que se aplica la carga.

También se escogió un perfil de acero en I sobre el que colocar las probetas durante los ensayos para que éstas no estuvieran en contacto directo con el suelo. La anchura sobre la que colocar las probetas debía ser, al menos, tan ancha como las probetas, es decir, entre dieciséis y dieciocho centímetros. Hasta justo el momento anterior a la ejecución del ensayo y sobre este perfil se colocó un par de cuñas de madera de manera que el murete no se viera sometido a esfuerzos por la acción de su propio peso y, por tanto, los resultados posteriores, se vieran afectados.

Tras la realización del ensayo del muro 01 se decidió cambiar el método de aplicación de la carga según se explicó anteriormente. Con las esquinas que se situarían en la posición vertical cortadas a la altura de la segunda fila de bloques con un ángulo de  $45^\circ$  la estabilidad del murete era exponencialmente mayor que con los útiles de acero. De esta manera y con la aplicación de una capa de yeso tanto en el apoyo inferior como en el superior (ver figura 2.22), la aplicación de la carga se realizaría de manera mucho más uniforme y sin necesidad de usar ningún otro útil.



**Figura 2.22** Aplicación de yeso sobre la superficie de aplicación de la carga.

## 2.4 Normativa de referencia

La decisión de qué normativa seguir en la campaña de ensayos ha sido una batalla constante durante todo el proceso. La falta de una normativa de referencia española para el adobe, así como la escasez de normativas para dicho material en todo el mundo, nos han invitado a tomar normativas más generalistas concernientes a fábricas de albañilería como referencia en algunos casos. En otras ocasiones, además, se ha hecho uso de normativas referentes a otros materiales, como el hormigón. A continuación se detalla la normativa usada según el tipo de ensayo realizado.

### 2.4.1 Normativa relativa a ensayos de probetas cúbicas

Se ensayaron un total de diez probetas cúbicas de dimensiones teóricas 80x80x80 mm. La normativa tomada como referencia para realizar estos ensayos conforme a la norma se muestra a continuación. Para cada norma de referencia, se indican las condiciones de cada una de ellas que se han seguido en los ensayos.

**NTE E.080, *Diseño y construcción con tierra reforzada*, Perú [1]**

- Ensayar un mínimo de seis probetas fabricadas con la misma composición que el material a emplear en los muretes.

**UNE-EN 772-1, *Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión*. [8]**

- Ensayar un mínimo de seis probetas.
- Fabricar probetas con las caras planas y paralelas y limpiar los platos de la máquina de ensayos.
- La duración del ensayo debe ser superior a un minuto.
- Para una resistencia a la compresión simple  $f_{ck} < 10 \text{ kN/mm}^2$ , la velocidad de carga recomendada es  $v < 0.05 \text{ N/(mm}^2\text{s)}$

### 2.4.2 Normativa relativa a ensayos brasileños

A través de ensayos brasileños, otras nuevas probetas de forma cilíndrica con dos diámetros distintos, de 100 y 150 mm, se han ensayado siguiendo la normativa que a continuación se describe. Para regir estos ensayos nos hemos basado en distintas normativas dedicadas al hormigón ante la ausencia de normativa específica para materiales de tierra como el adobe. Posteriormente adaptamos las especificaciones que aparecen en dicha normativa a nuestro material considerando cuántas veces más resistente es el hormigón con respecto al adobe. A continuación se detallan los aspectos de cada norma que se han seguido en la campaña de ensayos de este trabajo.

**Norma Internacional, ASTM C496-04, *Determinación de la resistencia a tracción indirecta de especímenes cilíndricos de concreto*. [11]**

- La velocidad de aplicación de la carga con control en desplazamientos debe ser 50+/-2 mm/min.
- Se definen distintos tipos de rotura: rotura por tracción limpia, por deformación o por combinación.

**Norma Internacional, ISO 1920-4:2005, *Testing of concrete: Strength of hardened concrete*. [5]**

- El incremento uniforme de la fuerza no debe ser superior a 0.2 MPa/s.

**Norma Española, UNE 12390-6 2010, *Ensayos de hormigón endurecido: Resistencia a tracción indirecta de probetas*. [7]**

- Incremento de tensión constante dentro del rango [0.04;0.06] MPa/s.
- La velocidad de carga requerida en N/s es:

$$R = \frac{s \cdot \pi \cdot L \cdot D}{2}$$

- La resistencia a tracción indirecta es:

$$f_{tk} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot D}$$

### 2.4.3 Normativa relativa a ensayos de muretes

Los muretes tienen unas dimensiones teóricas de 840x830x160 mm, están compuestos por nueve hiladas de dos bloques y media y tienen un tiempo de curado un año. La mayor diferencia de longitud entre las aristas principales es de un centímetro y medio. Las normas de referencia utilizadas, junto con los aspectos de cada una de ellas que se siguieron, para gobernar este ensayo son:

**NNMX-C464-ONNCCE-2010, *Determinación de la resistencia a compresión diagonal y de la rigidez a cortante de muretes de mampostería de barro y de concreto*, Nuevo México.** [24]

- Probeta con una longitud de al menos una vez y media la máxima dimensión de la pieza y con el número de hiladas para que la altura sea aproximadamente igual a la longitud.
- Para distribuir la carga de compresión en las esquinas del murete, se debe emplear un par de cabezales suficientemente rígidos para aplicar la carga de modo uniforme. En ningún caso los cabezales deben cubrir más de la primera hilada del murete.
- Entre la probeta y el cabezal, o en su caso el ángulo de acero, se debe colocar una capa de yeso con espesor máximo de cinco milímetros para asegurar la distribución uniforme de carga durante la prueba.
- Para determinar el módulo de rigidez a cortante se deben emplear transductores de desplazamiento dispuestos sobre las diagonales de los muretes. La longitud calibrada medida en sentido horizontal no debe diferir en más de 5% con respecto a la longitud calibrada medida en el sentido vertical.
- Los lados del murete deben ser iguales.
- Se deben ensayar, al menos, seis especímenes.
- Los muretes deben de almacenarse en condiciones de laboratorio durante al menos 28 días

**Norma Internacional, ASTM E519, *Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages*.** [19]

- La longitud del cabezal de aplicación de la carga debe ser  $<1/8$  de la longitud total.
- Se deben ensayar, al menos, tres especímenes.
- El tiempo de curado mínimo es de veintiocho días.
- El tiempo de aplicación de la carga debe ser tal que la máxima carga se alcance en un periodo de tiempo no inferior a un minuto y no superior a dos minutos.

**RILEM. TC 76-LUM, *Diagonal Tensile strength tests of small wall specimens*.** [21]

- Se deben ensayar, al menos, cinco especímenes.
- Las juntas deberán tener el mismo espesor y estar completamente rellenas de mortero.
- El tiempo de curado mínimo es de veintiocho días en condiciones de laboratorio.

### 3 Ejecución de los ensayos

---

*"Cuando sientas que todo se pone en tu contra, recuerda que un avión despegó contra el viento, no a favor" Henry Ford*

El proceso de ejecución de la campaña de ensayos que se llevó a cabo para la elaboración del presente trabajo comenzó en la última semana del mes de marzo y finalizó a mediados del mes de junio del presente año, 2017. Este proceso ha consistido en someter a los distintos especímenes con los que se contaba, probetas cúbicas, cilíndricas y muretes, a unos ensayos y obtener de éstos unos resultados.

A partir de los resultados que hemos obtenido de los sensores y de las máquinas de ensayos, hemos podido calcular:

- **Ley de comportamiento.** A través de las curvas tensión-deformación obtenidas de los ensayos a compresión simple ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ) y a compresión diagonal ( $\tau$ - $\gamma$ ). Para obtener estas curvas, es necesario conocer el área de la probeta que se encuentra sometida a la carga y la longitud sobre la que se mide el desplazamiento para así poder calcular la deformación.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

Los valores de  $\tau$  y  $\gamma$  se definirán a continuación.

- **Resistencia a compresión simple,  $f_{ck}$ .** Valor de la tensión para el esfuerzo máximo que puede soportar el material bajo una carga de compresión.
- **Deformación pico,  $\varepsilon_k$ .** Valor de la deformación que sufre el material cuando éste alcanza su máxima resistencia ( $f_{ck}$ ).
- **Módulo de elasticidad,  $E$ .** También conocido como módulo de Young, es la pendiente de la curva tensión-deformación en su tramo lineal. Para garantizar que el valor que se toma es suficientemente representativo de la pendiente de dicho tramo, se pueden tomar el módulo de elasticidad secante a 1/3 o 2/3 de  $f_{ck}$ , o el valor de la pendiente entre ambos puntos, al cual designaremos como valor medio. Obtenemos así lo que posteriormente denominaremos como  $E_{1/3}$ ,  $E_{2/3}$  o  $E_{medio}$ , respectivamente.

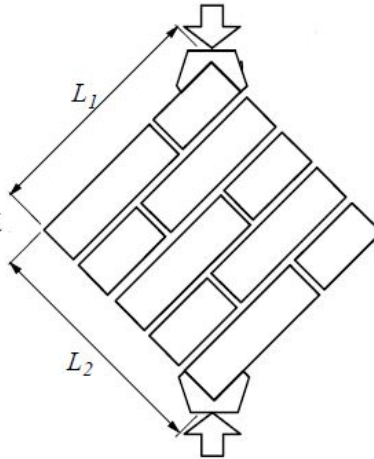
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

- **Resistencia a la tracción en ensayos de compresión diagonal,  $\sigma_I$ .** Consideramos la hipótesis sobre el valor de esta resistencia que caracteriza a la mampostería de adobe según la norma RILEM [21]. Esta norma define un estado de tensión de cortante pura en el punto medio del espécimen, o dicho de otra forma, el estado tensional de los círculos de Mohr del espécimen está centrado en el origen de coordenadas.

$$\sigma_I = \frac{F}{A_n}$$

$$A_n = \frac{L_1 + L_2}{2} \cdot t \cdot \sqrt{2}$$

donde  $A_n$  representa el área neta de la probeta,  $L_1$  y  $L_2$  son los lados del murete y  $t$  el espesor del mismo.

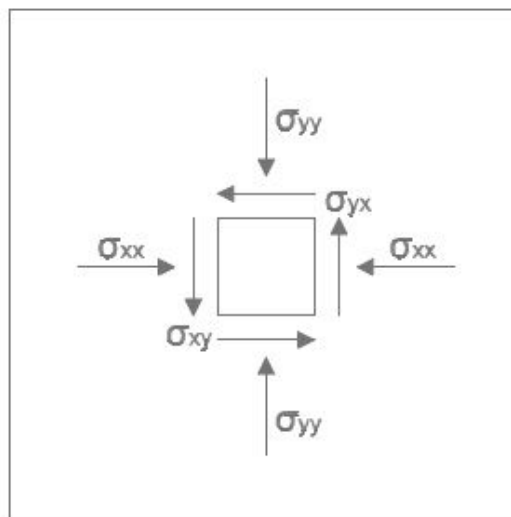


**Figura 3.1** Dimensiones de la probeta.

- **Resistencia a la compresión simple,  $\tau_{max}$ .** Es el valor máximo de la tensión de cortante que se define como,

$$\tau = \frac{F}{A_n}$$

donde  $A_n$  representa el área neta de la probeta descrita también para la resistencia a la tracción en ensayos de compresión diagonal. En la figura 3.2 se muestra la interpretación de la tensión de cortante sobre un murete con el símbolo  $\sigma_{xy}$ .



**Figura 3.2** Interpretación de la tensión de cortante sobre un murete.



- **Deformación a cortante,  $\gamma$ .**

$$\gamma = \frac{\Delta V}{g_v} + \frac{\Delta H}{g_h}$$

donde,  $\Delta V$  es el acortamiento vertical,  $\Delta H$  el alargamiento horizontal,  $g_v$  es la distancia entre puntos de fijación del sensor vertical y  $g_h$  la distancia entre puntos de fijación del sensor horizontal.

- **Módulo de rigidez,  $G$ .** Siempre utilizaremos el valor medio ( $G_{medio}$ ) dentro del periodo de asentamiento, es decir, el valor de la pendiente entre 1/3 y 2/3 de la resistencia a compresión en las curvas  $\tau - \gamma$ , ya que otros tramos pudieran no ser suficientemente representativos debido al periodo de asentamiento del material en dichas curvas.

$$G = \frac{\tau}{\gamma}$$

- **Resistencia a la tracción característica en ensayos de tracción indirecta,  $f_{tk}$ .** Para los ensayos de tracción indirecta, siendo  $F$  la fuerza máxima que se aplica durante el ensayo,  $L$  la longitud de la probeta y  $D$  el diámetro de la misma, se define la resistencia del material a la tracción característica de ensayos de tracción indirecta como [7]:

$$f_{tk} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot D}$$

## 3.1 Descripción de la maquinaria empleada

### 3.1.1 Pórtico de carga principal

La máquina utilizada para los ensayos de compresión diagonal sobre muretes es un pórtico de carga de la marca *Servosis*, con una célula de carga de capacidad máxima de 100 toneladas y un recorrido de 300 mm de carrera. Se trata del pórtico de carga principal dentro de las instalaciones del laboratorio de Estructuras en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla que se muestra en la figura 3.4.

Únicamente cuenta con un eje móvil, el superior, al que se le ha añadido un perfil en forma de H para que la carga se distribuya de la forma más uniforme posible durante su aplicación en los ensayos. Del mismo modo, en la base del espécimen se colocó otro perfil de las mismas características, con los centros de gravedad de ambos perfiles lo más alineados posible para evitar excentricidades, que también sirviera de apoyo a la probeta.

La máquina va conectada a un computador desde el que se controlan todos los parámetros del ensayo como, por ejemplo, la velocidad de aplicación de la carga o si el ensayo se controla en carga o en desplazamiento.

El software informático que trata y almacena la señal que recibe de los diferentes canales de medida se denomina *PCD 2k* y también es de la marca *Servosis*. Para la medida y el control de los sensores se usó el software *Measurement & Automation*.

Para poder trabajar de manera más cómoda con las tablas de los resultados obtenidos, se toma un número de puntos por segundo no muy elevado, en nuestro caso de cinco puntos por segundo. Dadas las características del ensayo y la gran cantidad de sensores que se utilizaron, un total de diez, el procedimiento de adquisición de datos se antojaba complejo, por lo que se decidió recurrir a un dispositivo de adquisición de datos (DAQ) de la marca *National Instruments*. Este dispositivo recogía todos los canales físicos y enviaba la información mediante una entrada USB a un ordenador que, utilizando el software de *LabView* también de la marca *National Instruments*, se encargaba de convertir los datos de entrada de voltaje en desplazamientos. A él también se conectaba la caja de conexiones diseñada específicamente para esta campaña de ensayos (figura 2.4) y que buscaba simplificar la conexión de todos los sensores al DAQ a través de un par de conexiones. Todo este aparataje se encontraba sobre una mesa de trabajo que se situó justo al lado del pórtico de carga principal, para poder seguir los ensayos desde dicha posición, tal y como se muestra en la figura 3.5.

Posteriormente a la ejecución de los ensayos se procedió al almacenaje de los adobes que no resultaron dañados durante los mismos, los cuales en este caso fueron la inmensa mayoría. El objetivo de esta acción es poder analizar posteriormente, mediante el reciclaje de las piezas de adobe o mediante la construcción de nuevos especímenes con esos adobes, las características mecánicas del adobe después de que se realicen ensayos de compresión sobre la mampostería.



**Figura 3.3** Pórtico de carga principal del laboratorio de Estructuras. Marca *Servosis*.



**Figura 3.4** Mesa de trabajo con todos los equipos conectados.

### 3.1.2 Máquina universal de ensayos

Para la ejecución de los ensayos de probetas cúbicas de adobe se utilizó una máquina más acorde a las características del ensayo, sobre todo en cuanto a dimensiones se refería. La máquina elegida fue una máquina universal de ensayos de la marca *Servosis*, con una célula de carga de capacidad 5 toneladas y una carrera con 200 mm de recorrido total. Dicha máquina se encuentra también dentro de las instalaciones del laboratorio de Estructuras en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla y se muestra en la figura 3.6.

La máquina está constituida por un eje superior móvil y un eje inferior fijo, de tal manera que cuando la carga se aplica, ésta se reparte de manera uniforme gracias a los platos que poseen ambos ejes. El eje superior, encargado de aplicar la carga en el centro de la probeta, desciende desde su posición de referencia hasta que entra en contacto con la probeta cúbica antes de comenzar el ensayo para que el recorrido asociado

al acoplamiento del plato sobre la probeta sea el menor posible.

La máquina va conectada a un computador, del mismo modo que ocurría con el pórtico de carga principal, desde el que se controlan todos los parámetros del ensayo como, por ejemplo, la velocidad de aplicación de la carga, o si el ensayo se controla en carga o en desplazamiento.



**Figura 3.5** Máquina universal de ensayos. Marca *Servosis*.

El software informático que trata y almacena la señal que se recibe de los diferentes canales de medida es *PCD 2k*, el cual cuenta con una serie de funciones que facilitan el ensayo, como el número de puntos que se pueden tomar por segundo en las mediciones de la propia máquina del ensayo. Para la medida y el control de los sensores se utilizó el software *Measurement & Automation*. Ambos programas son los mismos que se utilizaron con los ensayos de compresión diagonal sobre muretes, debido a que la marca de ambas máquinas es la misma.

### 3.1.3 Prensa hidráulica

Para llevar a cabo los ensayos de tracción indirecta (ensayos brasileños) sobre las unidades de adobe con forma cilíndrica se utilizó una prensa hidráulica capaz de aplicar la carga tal y como rige dicho ensayo. La prensa, modelo MES 300, es también de la marca *Servosis* y se encuentra también en las dependencias del laboratorio de Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla (figura 3.7), con una célula de carga de capacidad hasta 5 toneladas y una carrera con 200 mm de recorrido total [12]. Finalmente, tras unos primeros resultados de los ensayos poco satisfactorios debido a las complicaciones que aparecieron para aplicar la carga, se decidió seguir realizando los ensayos de tracción indirecta en la máquina universal de ensayos descrita anteriormente.



**Figura 3.6** Prensa hidráulica MES 300. Marca *Servosis*.

## 3.2 Resultados de los ensayos

A continuación, describimos todas las probetas (cúbicas, cilíndricas y muretes) ejecutadas durante la campaña de ensayos que concierne a este trabajo. Cabe destacar que las probetas se han mantenido siempre almacenadas bajo condiciones de laboratorio, con una temperatura controlada entre los 15°C y los 25°C y una humedad relativa en torno al cincuenta por ciento, dentro del laboratorio de Estructuras en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.

Para los resultados obtenidos, cabe destacar la dificultad de encontrar en la norma el procedimiento exacto para la obtención de los mismos, por lo que en algunas ocasiones se hizo uso de normativa referente a otros materiales, como el hormigón, o procedente de otros países.

### 3.2.1 Ensayos de compresión simple sobre probetas cúbicas

En primer lugar se muestra la tabla 3.1 en la que se recoge, a modo de inventario, las unidades de probetas cúbicas ensayadas durante la campaña de ensayos y sus características principales. .

**Tabla 3.1** Características de las probetas cúbicas ensayadas. Edad, lote de material al que pertenecen, características geométricas o tipo de control que se utilizó durante el ensayo (fuerza o desplazamiento).

Unidad	Edad	Lote	t (mm)	w (mm)	h (mm)	Control (F ó D)
L2-L1	1 año	2	80	80	80	D
L2-L2	1 año	2	80	80	80	D
L2-L3	1 año	2	80	80	80	D
L2-L4	1 año	2	80	80	80	D
L2-L5	1 año	2	80	80	80	D
L2-T1	1 año	2	80	80	80	D
L2-T2	1 año	2	80	80	80	D
L2-T3	1 año	2	80	80	80	D
L2-T4	1 año	2	80	80	80	D
L2-T5	1 año	2	80	80	80	D





**Figura 3.7** Ensayo a compresión simple de la probeta cúbica L2-L4.

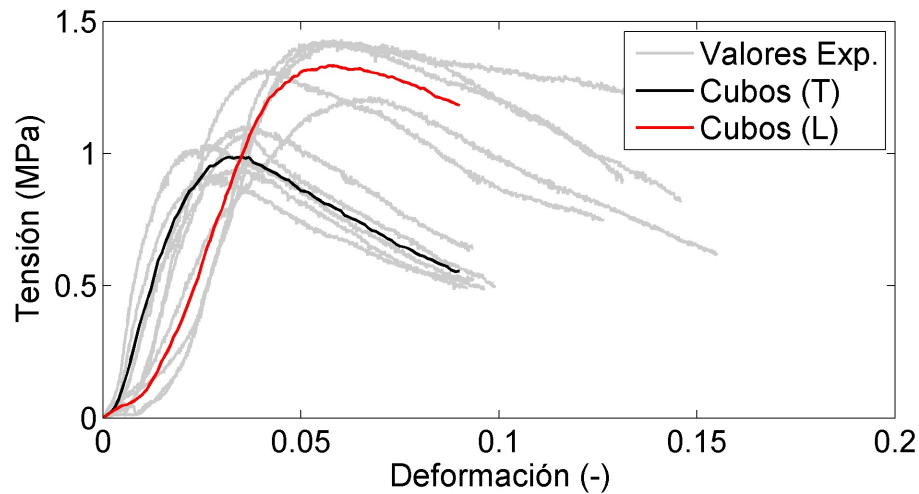
Los ensayos se llevaron a cabo con control en desplazamientos, según muestra la tabla 3.1, siguiendo las siguientes rampas de carga:

- 1ª rampa: 1 mm/min hasta los 2 mm.
- 2ª rampa: 3 mm/min hasta la asíntota horizontal de la curva o rotura de la probeta.

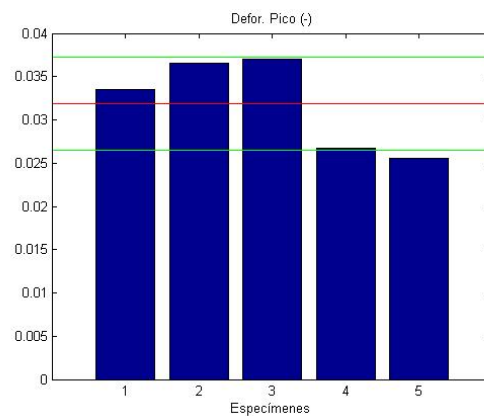
La aplicación de la carga a través de dos rampas distintas tiene varios propósitos. Uno de ellos es ahorrar tiempo en el ensayo. Otro, más relacionado con el material, es evitar que la aplicación afecte a la resistencia del propio material.

Representamos las curvas tensión-deformación ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) en la figura 3.9, las cuales nos aportan información representativa del material y no de la probeta, para todas las probetas cúbicas ensayadas. En dicha figura se muestran las curvas obtenidas para todas las probetas cúbicas ensayadas, tanto en dirección transversal como longitudinal, en color grisáceo, además de las curvas medias por separado de las probetas ensayadas en dirección transversal (destacada en color negro, T) y en dirección longitudinal (resaltada en color rojo, L). Estas curvas poseen la típica forma de las curvas para la ley de comportamiento a compresión del adobe, con un primer tramo prácticamente lineal creciente, hasta que alcanza el máximo valor de la deformación, a partir del cual se produce el ablandamiento del material representado en la curva con el descenso progresivo del valor de la tensión.

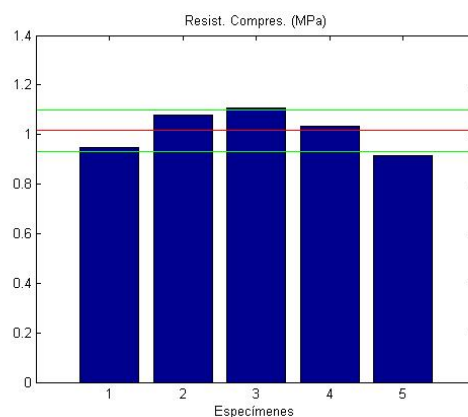
A continuación se muestran (figura 3.10-3.15) los valores de las propiedades del material obtenidas para las probetas cúbicas ensayadas a través de gráficos de barras: deformación pico ( $\epsilon_k$ ), resistencia a compresión simple ( $f_{ck}$ ) y módulo de elasticidad medio ( $E_{medio}$ ). En este mismo gráfico se muestra en color rojo el valor medio, y en color verde el valor medio  $\pm$  la desviación típica. Se muestran los resultados separados en distintos diagramas de barras en función de la dirección de aplicación de la carga sobre el cubo (transversal o longitudinal).



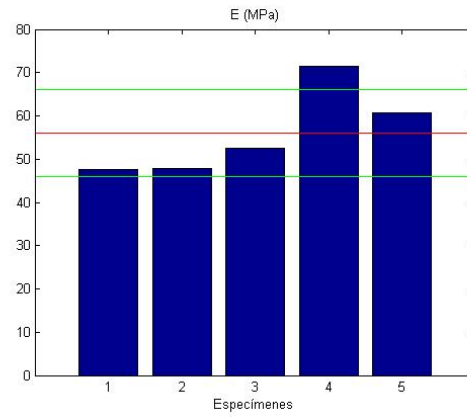
**Figura 3.8** Curvas tensión-deformación para los ensayos de probetas cúbicas. En color grisáceo se muestran los resultados experimentales para todas las probetas, en color negro la curva media para las probetas ensayadas en dirección transversal y en color rojo la curva media para las probetas ensayadas en dirección longitudinal.



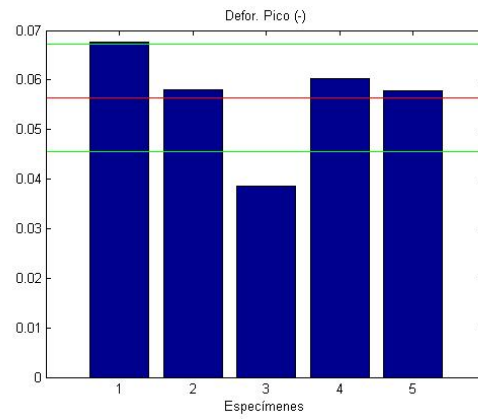
**Figura 3.9** Valor de la deformación máxima alcanzada ( $\epsilon_k$ ) para cada probeta cúbica ensayada en dirección transversal. Edad: 1 año.



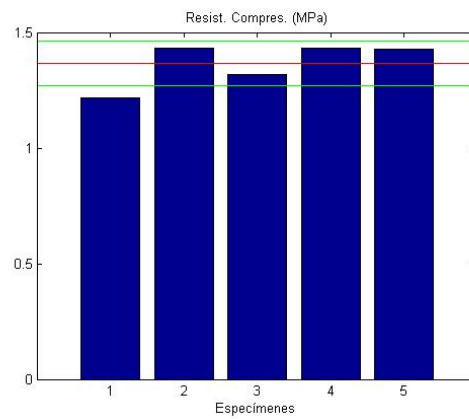
**Figura 3.10** Valor de la resistencia a compresión simple ( $f_{ck}$ ) alcanzada para cada probeta cúbica ensayada en dirección transversal. Edad: 1 año.



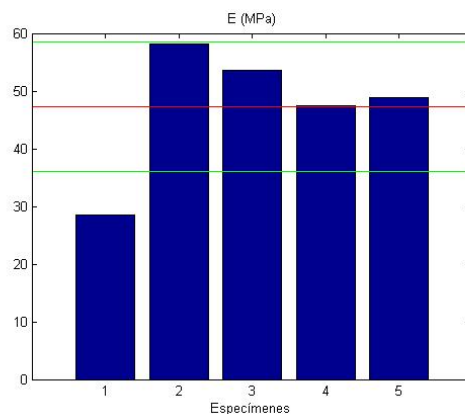
**Figura 3.11** Valor del módulo de elasticidad medio ( $E_{medio}$ ) alcanzado para cada probeta cúbica ensayada en dirección transversal. Edad: 1 año.



**Figura 3.12** Valor de la deformación máxima alcanzada ( $\epsilon_k$ ) para cada probeta cúbica ensayada en dirección longitudinal. Edad: 1 año.



**Figura 3.13** Valor de la resistencia a compresión simple ( $f_{ck}$ ) alcanzada para cada probeta cúbica ensayada en dirección longitudinal. Edad: 1 año.



**Figura 3.14** Valor del módulo de elasticidad medio ( $E_{medio}$ ) alcanzado para cada probeta cúbica ensayada en dirección longitudinal. Edad: 1 año.

### 3.2.2 Ensayos de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas

**Tabla 3.2** Características de los cilindros ensayados mediante ensayos de tracción indirecta. Edad de las probetas, lote del material, geometría y tipo de control para la aplicación de la carga, ya sea en fuerza (F) o en desplazamientos (D).

Unidad	Edad	Lote	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	Control (F ó D)
P01G	1 año	2	300	150	F/D
P02G	1 año	2	300	150	F/D
P03G	1 año	2	300	150	D
P04G	1 año	2	300	150	D
P05G	3 meses	E	300	150	D
P06G	3 meses	E	300	150	D
P07G	3 meses	E	300	150	D
P08G	3 meses	E	300	150	D
P01S	1 año	2	165	100	D
P02S	1 año	2	170	100	D
P03S	1 año	2	174	100	D
P04S	1 año	2	188	100	D
P05S	1 año	2	188	100	D

Se realizaron un total de trece ensayos de tracción indirecta, los ocho primeros sobre las probetas de mayor tamaño (diámetro 150 mm y denominadas con la letra G) y los cinco restantes sobre las probetas más pequeñas (diámetro de 100 mm, denominadas con la letra S), según se muestra en la tabla 3.2 a modo de resumen.

La velocidad de aplicación de la carga para este ensayo, obtenida a partir de la normativa que definimos anteriormente [11] [5] [7], es proporcional a la de ensayos semejantes utilizando el hormigón como material. Es decir, si la resistencia a la tracción indirecta en este tipo de ensayos para el hormigón es, del orden de, unas 30 veces mayor que para el adobe, la velocidad de aplicación de la carga que se ha considerado para el adobe también será unas 30 veces menor que la velocidad utilizada para el hormigón (unos 0.05 MPa/s). Esto se traduce en que la carga se aplicará a una velocidad de unos 0.0016 MPa/s para nuestras probetas de adobe, lo que equivale a una velocidad de 9.6 kN/min y que justifica que en los dos primeros ensayos se realizara un control tanto en desplazamientos como en fuerza, para garantizar el asentamiento de la probeta, con una rampa controlada en fuerza a dicha velocidad aproximadamente.





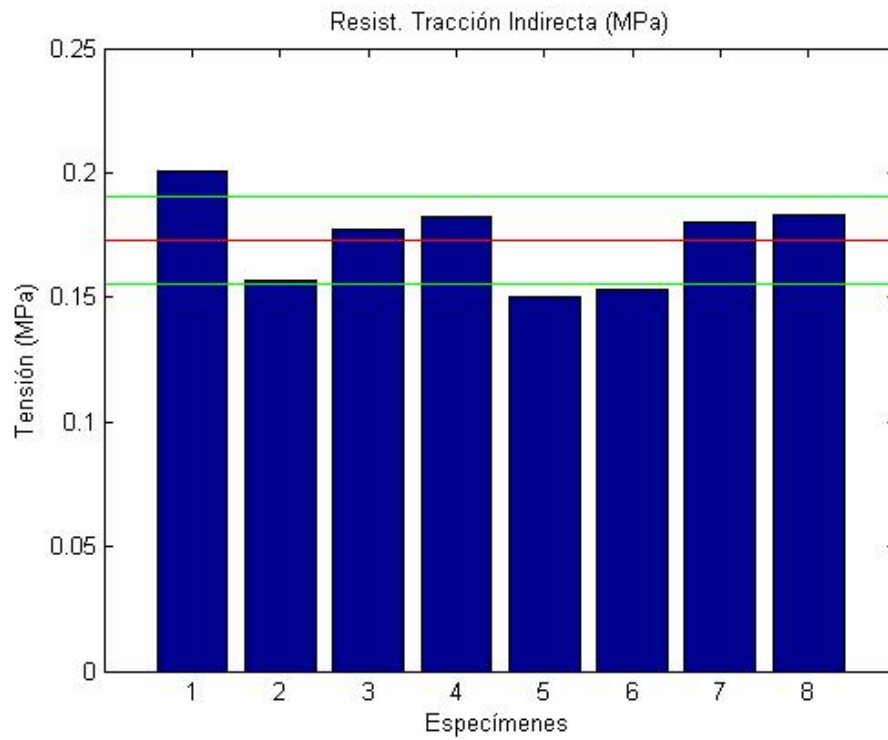
**Figura 3.15** Ejecución del ensayo de tracción indirecta sobre la probeta cilíndrica P01S.

- 1ª rampa: 5 mm/min hasta los 2 mm.
- 2ª rampa: 10 kN/min hasta los 20 mm.
- 3ª rampa: 5 mm/min hasta los 25 mm o agotamiento de la probeta.

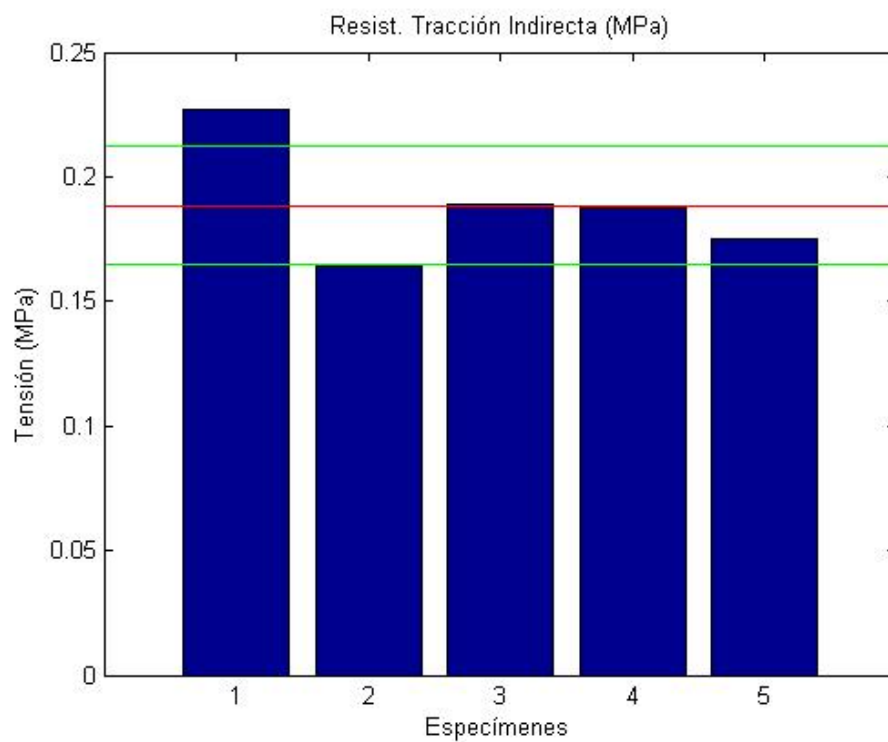
A partir del segundo ensayo, con la experiencia adquirida en los dos primeros ensayos, éstos se realizaron directamente con control en desplazamientos.

- Una única rampa: 5 mm/min hasta los 10 mm.

Mostramos a continuación, en las figuras 3.17 y 3.18, los diagramas de barras para los valores de tensión de tracción indirecta ( $f_{tk}$ ) obtenidos para los ensayos sobre ambos tipos de probetas cilíndricas, junto con el valor medio (línea roja) y el valor medio  $\pm$  la desviación típica (líneas verdes). Dichos valores de la tensión de tracción indirecta se calcularon para el valor de la fuerza máxima, que se alcanza en el momento en el que se produce la grieta que ocasiona el colapso de la probeta cilíndrica y que coincide con el máximo de la curva fuerza-desplazamientos, que para este tipo de ensayos posee una forma triangular, es decir, linealmente creciente hasta el máximo y, a partir de ese punto, linealmente decreciente.



**Figura 3.16** Resistencia a la tracción para ensayos de tracción indirecta ( $f_{tk}$ ) para los cilindros grandes (diámetro 150 mm).



**Figura 3.17** Resistencia a la tracción para ensayos de tracción indirecta ( $f_{tk}$ ) para los cilindros pequeños (diámetro 100 mm).

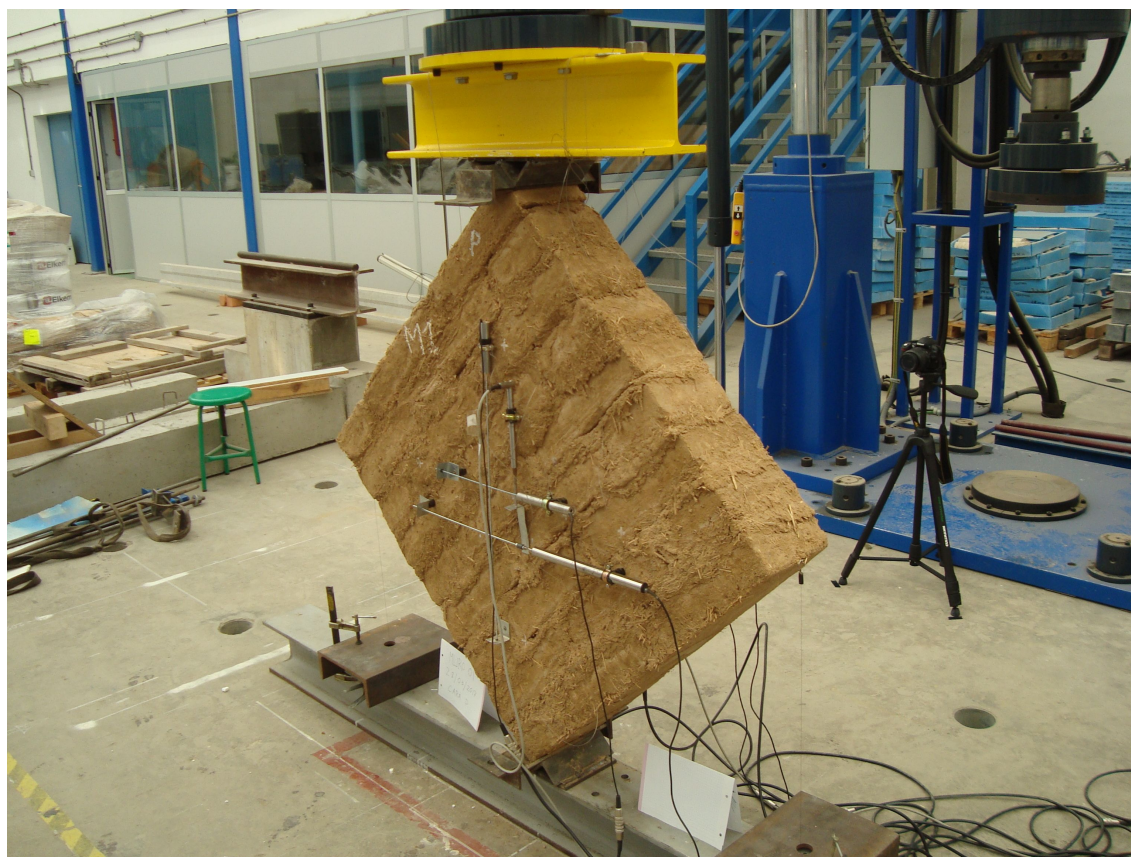
### 3.2.3 Ensayos de compresión diagonal sobre muretes

La velocidad de aplicación de la carga controlada en desplazamientos fue, en un principio, de 1 mm/min. Tras un primer ensayo con unos resultados bastante mejorables, se decidió (entre otras mejoras) aumentar la velocidad de aplicación de la carga hasta 2 mm/min para acogernos a las recomendaciones de la norma sobre cuánto tiempo debe tardarse en alcanzar la máxima carga (entre uno y dos minutos) según describimos anteriormente en la norma [19].

Según se muestra en la tabla 3.3, finalmente se ejecutaron seis de los ocho muretes disponibles. En esta misma tabla se muestran todas las unidades de muretes que fueron ensayadas, así como algunas de sus características.

**Tabla 3.3** Características de los muretes ensayados. Edad, lote de material, dimensiones geométricas y control de la carga, ya sea en fuerza (F) o desplazamientos (D)..

Unidad	Edad	Lote	$L_1$ (mm)	$L_2$ (mm)	t (mm)	Control (F ó D)
M01	1 año	1	880	875	180	D
M02	1 año	1	875	890	180	D
M03	1 año	2	875	875	175	D
M04	1 año	2	855	875	180	D
M05	1 año	2	875	875	175	D
M06	1 año	2	875	875	180	D



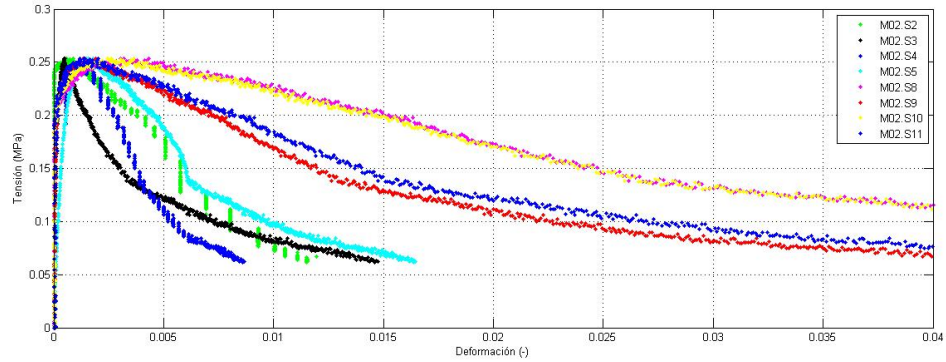
**Figura 3.18** Ensayo de compresión diagonal sobre el muro M01.

Mostramos a continuación las curvas tensión de cortante ( $\tau$ ) frente a deformación de cortante ( $\epsilon$ ) para los distintos muretes ensayados. En las distintas figuras, desde la 3.20 hasta la 3.24, se observan, por colores, los resultados obtenidos para cada muro y cada sensor (desde el sensor S2 hasta el sensor S11, según la tabla 2.1, a excepción de los sensores S6 y S7 que no se incluyeron por la gran dispersión que mostraban). La forma de

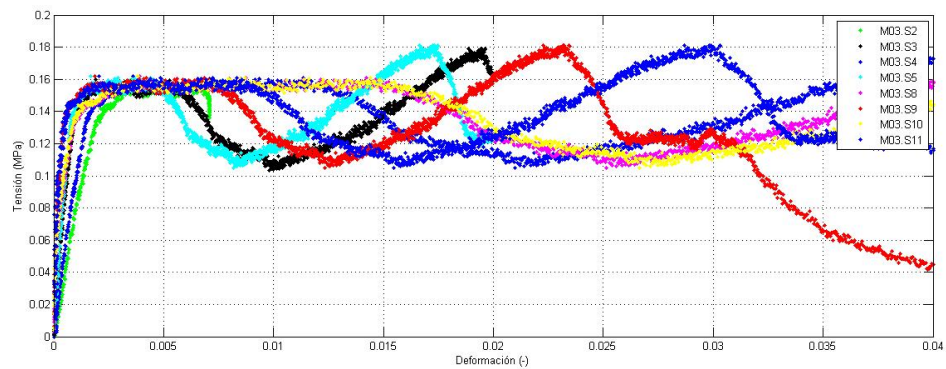


estas curvas se asemeja de forma coherente a las curvas presentadas en el apartado 3.2.1 para los ensayos de compresión simple: posee un primer tramo prácticamente lineal y, tras alcanzar el máximo, un descenso de la curva de forma progresiva debido al ablandamiento del material.

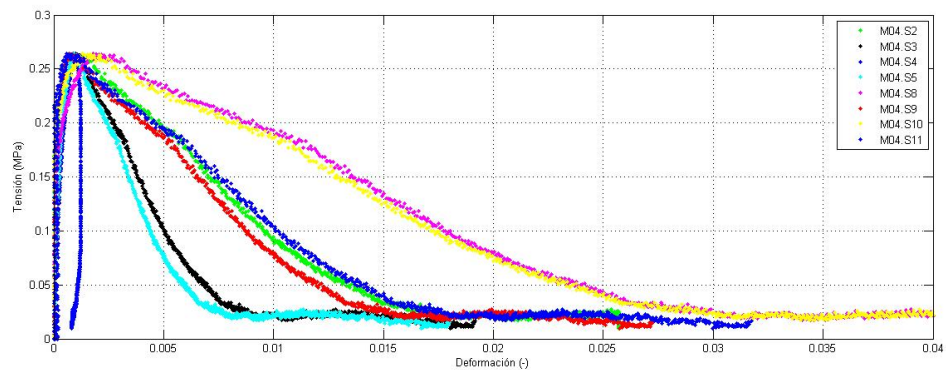
El murete M01 no ha sido incluido puesto que su ensayo no fue satisfactorio, ya que la rotura se produjo por deslizamiento entre hiladas de adobe, y sus resultados son muy dispares con respecto al resto de muros ensayados, en los que se obtuvo una modo de fallo más normalizado para este tipo de ensayos de compresión diagonal, en los que la grieta avanza a través de los propios adobes y de las juntas, desde la zona de contacto con el pórtico de carga hasta la base en la que apoya en muro.



**Figura 3.19** Curva tensión de cortante ( $\tau$ )-deformación ( $\epsilon$ ) para el muro M02.

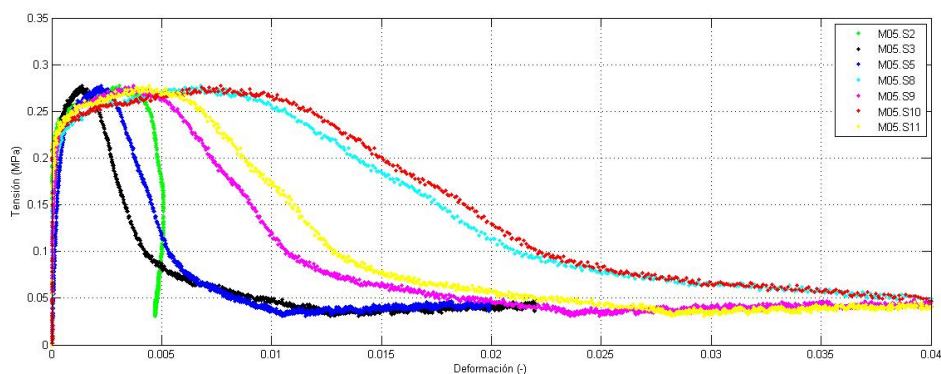


**Figura 3.20** Curva tensión de cortante ( $\tau$ )-deformación ( $\epsilon$ ) para el muro M03.

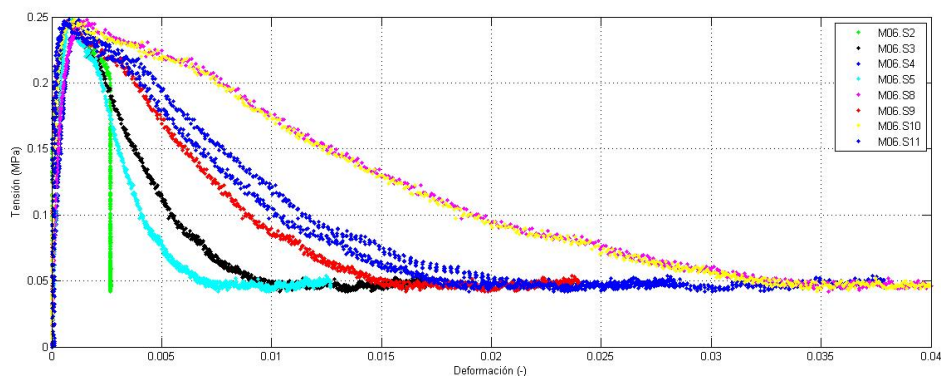


**Figura 3.21** Curva tensión de cortante ( $\tau$ )-deformación ( $\epsilon$ ) para el muro M04.

En la figura 3.25 se representan, sobre los resultados experimentales para las curvas de tensión de cortante ( $\tau$ ) frente a deformación de cortante ( $\gamma$ ), los valores para el módulo de rigidez medio ( $G_{medio}$ ). Cabe destacar



**Figura 3.22** Curva tensión de cortante ( $\tau$ )-deformación ( $\epsilon$ ) para el muro M05.



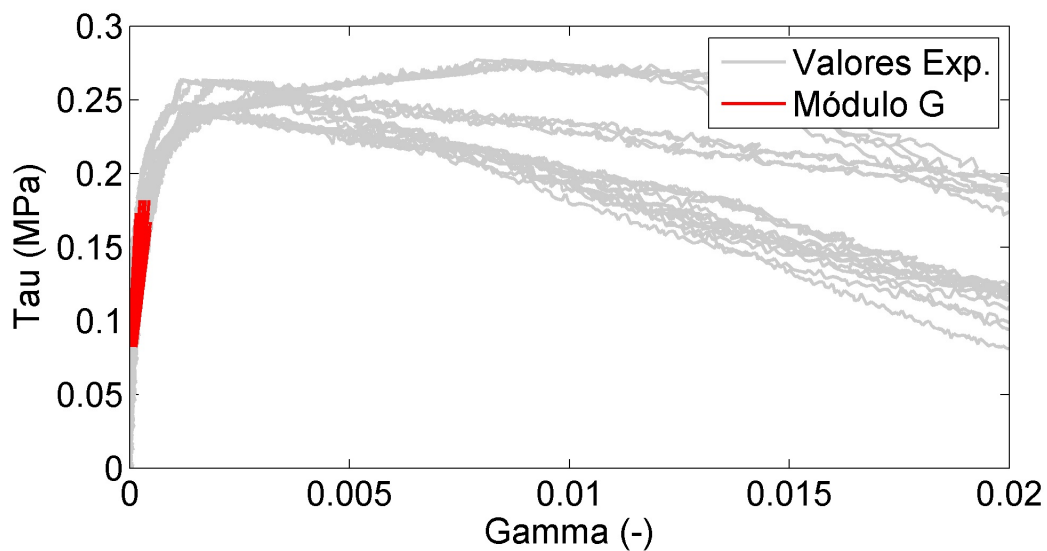
**Figura 3.23** Curva tensión de cortante ( $\tau$ )-deformación ( $\epsilon$ ) para el muro M06.

que se ha realizado una selección de las curvas a representar, en función de una serie de criterios.

En primer lugar, debe considerarse que se tienen que tomar pares de sensores para representar las curvas, puesto que se necesita una componente horizontal y otra vertical de los desplazamientos medidos por los sensores para calcular el valor de la deformación de cortante ( $\gamma$ ), lo que genera una combinación de curvas que podrían representarse. En segundo lugar, y considerando esa lista de pares de sensores que podrían representarse, no todas las combinaciones son posibles puesto que, según se aprecia en figuras 3.19-3.23, los resultados de algunos sensores presentan mucha dispersión o directamente no son válidos puesto que el sensor no ha medido correctamente. En total, considerando estas condiciones, se han obtenido 22 curvas, o pares de sensores, adecuados que se presentan en la tabla 3.4.

**Tabla 3.4** Pares de sensores de cara murete seleccionados para ser representados.

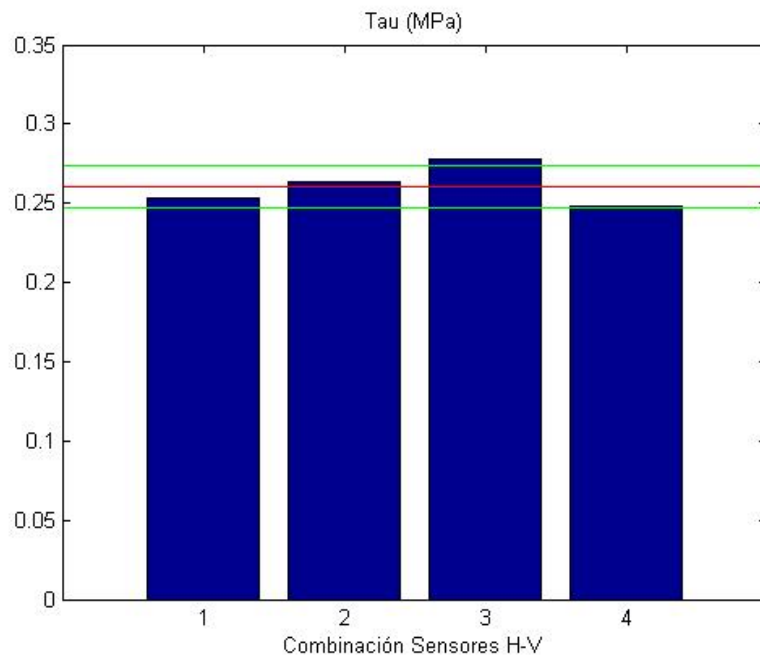
Murete	Par de sensores
M02	3-9
M02	5-11
M02	3-11
M02	5-9
M04	3-9
M04	4-10
M04	5-11
M04	3-11
M04	4-8
M04	5-9
M05	3-9
M04	5-11
M05	3-11
M05	5-9
M06	2-8
M06	3-9
M06	4-10
M06	5-11
M06	2-10
M06	3-11
M06	4-8
M06	5-9



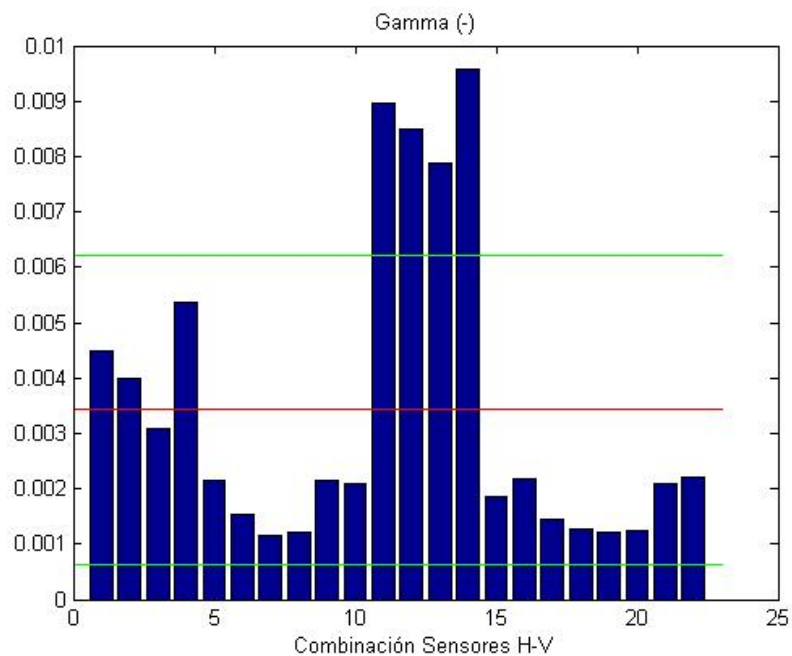
**Figura 3.24** Módulo de rigidez medio ( $G_{medio}$ ), en color rojo, sobre las curvas de tensión de cortante ( $\tau$ )-deformación de cortante ( $\gamma$ ) seleccionadas, en color grisáceo.

En las siguientes tres figuras (3.26-3.30) se representan los valores de las propiedades del material obtenidas a partir de los ensayos de compresión diagonal: resistencia a la compresión simple ( $\tau_{max}$ ), deformación de cortante máxima ( $\gamma_{max}$ ) y el módulo de rigidez medio ( $G_{medio}$ ). Estas propiedades han sido calculadas según

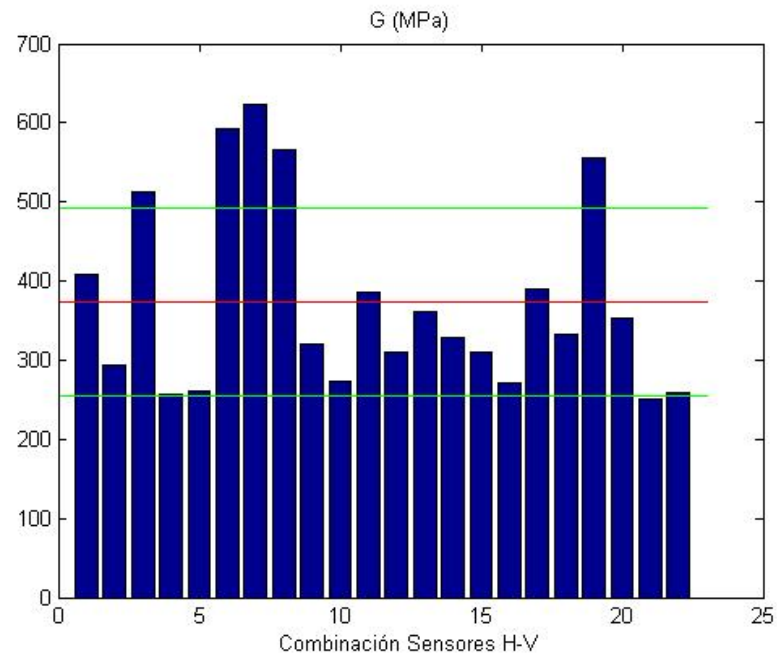
las expresiones expuestas al comienzo del presente capítulo. Todo ello para las curvas seleccionadas e incluyendo el valor medio con una línea de color rojo y el valor medio  $\pm$  la desviación típica con una línea de color verde.



**Figura 3.25** Resistencia a la compresión diagonal ( $\tau_{max}$ ) para los muretes M02, M04, M05 y M06 respectivamente.



**Figura 3.26** Deformación de cortante pico ( $\gamma_k$ ) para los muretes según los pares de sensores seleccionados.



**Figura 3.27** Módulo de rigidez  $G_{medio}$  para los muretes según los pares de sensores seleccionados.



## 4 Análisis de los resultados

---

*"Lo importante es no dejar de hacerse preguntas" Albert Einstein*

Los resultados obtenidos de los ensayos descritos en los capítulos anteriores han proporcionado una gran cantidad de información que procedemos a analizar en el presente capítulo para poder obtener conclusiones posteriormente.

Se comprueba a simple vista que las curvas tensión frente-deformación que se han obtenido de los ensayos de compresión simple y compresión son dispares entre sí, a pesar del minucioso cuidado que se ha mantenido durante toda el proceso de ejecución de los ensayos. Esto se debe al hecho de que el material, debido a la naturaleza de su composición, es heterogéneo, tal y como hemos corroborado en algunos ensayos. Por ello, realizar un número de ensayos suficientemente representativos, es fundamental para obtener unos resultados esclarecedores.

La comparación de propiedades según el tipo de ensayo que se muestra en el presente capítulo revela las grandes diferencias entre los distintos tipos de ensayos (compresión simple, tracción indirecta o compresión diagonal), así como diferencias dentro del mismo tipo de ensayo (por ejemplo con la colocación en posición longitudinal o transversal, o con el tamaño de la probeta), lo que nos ha llevado a analizar cada uno ellos por separado, sin perder nunca el objetivo final: la caracterización del adobe, como material y como mampostería.

Una de los principales escollos encontrados durante la elaboración de la campaña de ensayos ha sido la falta de normativa en nuestro país sobre los ensayos ejecutados, lo que nos ha llevado a recurrir a normativa referente a ensayos para fábricas de albañilería, en el caso de los ensayos de compresión, y referente también a ensayos sobre probetas de hormigón (sobre todo para el ensayo de tracción indirecta). Incluso, a veces, también se ha recurrido a normativa de otros países para contrastar más fuentes. Se hace así pues, un llamamiento a la estandarización de los ensayos que en este trabajo se describen con materiales de tierra en nuestro país.

La energía de deformación obtenida en los distintos ensayos también muestra diferencias. Principalmente se aprecia que en los ensayos de compresión diagonal la deformación asociada es menor que en los ensayos de compresión simple, lo cual demuestra que se trata de un material frágil y, por tanto, la energía que el material es capaz de absorber es baja. Como material frágil que es, el tipo de fractura que se ha detectado en los ensayos ha sido fractura por extensión, si bien existe otro tipo de fractura no deseada en nuestro caso, por deslizamiento entre hiladas de adobe, que se apreció en el ensayo de compresión diagonal del muro M01 y que motivó los cambios que se produjeron en el método de aplicación de la carga sobre el murete, según desarrollamos en capítulos anteriores.

Procedemos a analizar con mayor nivel de detalle los distintos tipos de ensayos por separado.

### 4.1 Análisis de los ensayos

#### 4.1.1 Análisis de los ensayos de compresión simple sobre probetas cúbicas

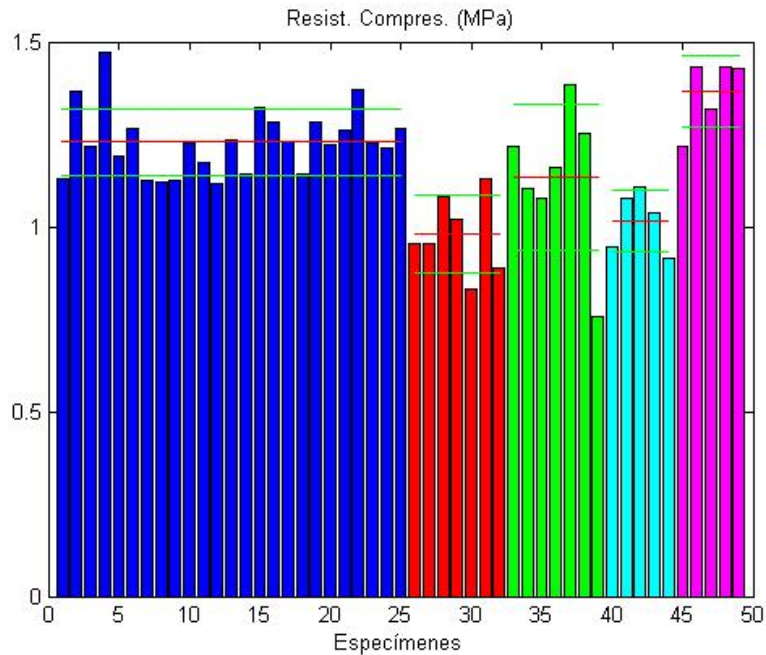
Los resultados obtenidos en los ensayos de probetas cúbicas son los que más dispersión ofrecen, en torno al 20%, tanto de forma absoluta como si comparamos los ensayos en posición transversal con los ensayos en

posición longitudinal. Cabe destacar como esta dispersión es mucho menor para los valores de resistencia a compresión, 7-8 %, que para el resto de propiedades del material, que oscila entre el 17 % y el 31 %.

Esto se debe al tamaño de las probetas, que al ser tan pequeño, magnifica cualquier imperfección de la probeta. Además, la anisotropía del material juega un importante papel: la distribución interior de la tierra y la paja en el proceso de fabricación y secado del material hacen prever unos mejores resultados si la carga se aplica en la dirección paralela a la dirección de secado (ensayos en dirección longitudinal) que si se hiciera en dirección perpendicular (ensayos en dirección transversal).

Este aspecto de la dispersión también se aprecia, de manera casi idéntica, para las probetas con menos de 1 año de edad que también se ejecutaron en otra campaña de ensayos y cuyos resultados para la resistencia a compresión simple ( $f_{ck}$ ), deformación pico ( $\varepsilon_k$ ) y módulo de elasticidad medio ( $E_{medio}$ ), se muestran a continuación en las figuras 4.1-4.3, a través de unos diagramas de barras. En estas campañas experimentales previas se ensayaron 25 probetas cúbicas con una edad de un mes y otras 14 probetas cúbicas con una edad de seis meses. Los resultados obtenidos durante estas campañas se adjuntan en el anexo B de este mismo trabajo.

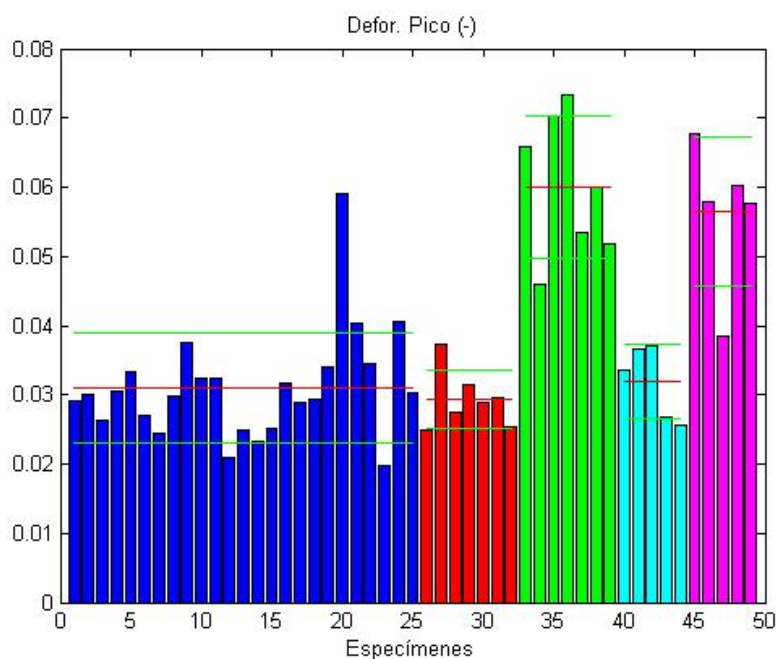
En color azul se muestran los 25 especímenes ensayados en posición transversal durante la primera campaña de ensayos, realizada cuando las probetas cúbicas poseían una edad de un mes. Los colores rojo y verde muestran las 14 probetas ensayadas en posición transversal (7 unidades) y longitudinal (las 7 unidades restantes), respectivamente, con una edad de seis meses. Por último, en color celeste y magenta se incluyen los resultados para las 10 probetas cúbicas ensayadas durante la presente campaña experimental en posición transversal (5 unidades en total) y longitudinal (otras cinco unidades en total), respectivamente.



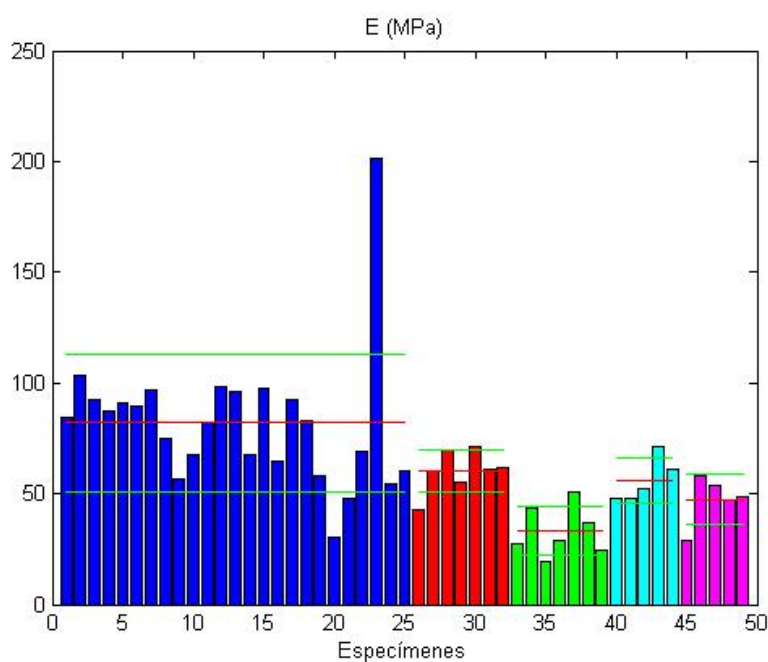
**Figura 4.1** Valor de la resistencia a compresión simple ( $f_{ck}$ ) para todas las probetas cúbicas ensayadas a compresión simple en campañas anteriores. Color azul: Posición transversal, 1 mes. Color rojo: Posición transversal, 6 meses. Color verde: Posición longitudinal, 6 meses. Color celeste: Posición transversal, 1 año. Color magenta: Posición longitudinal, 1 año.

Si se comparan los resultados de esta campaña con los resultados de campañas pasadas, se puede apreciar que existen variaciones significativas entre los valores medios obtenidos para la resistencia a compresión simple ( $f_{ck}$ ) entre ensayos en la misma dirección: en los ensayos en posición transversal se obtuvieron mayores valores para las probetas más jóvenes (un mes de edad), mientras que en los ensayos en posición longitudinal (de manera menos significativa) se obtuvieron mayores resultados para las probetas con mayor edad (un año). Ver figura 4.1.

Para la deformación pico ( $\varepsilon_k$ ) no existen variaciones tan significativas y los valores están más agrupados en función de si la carga se ha aplicado en dirección transversal o longitudinal (figura 4.2).



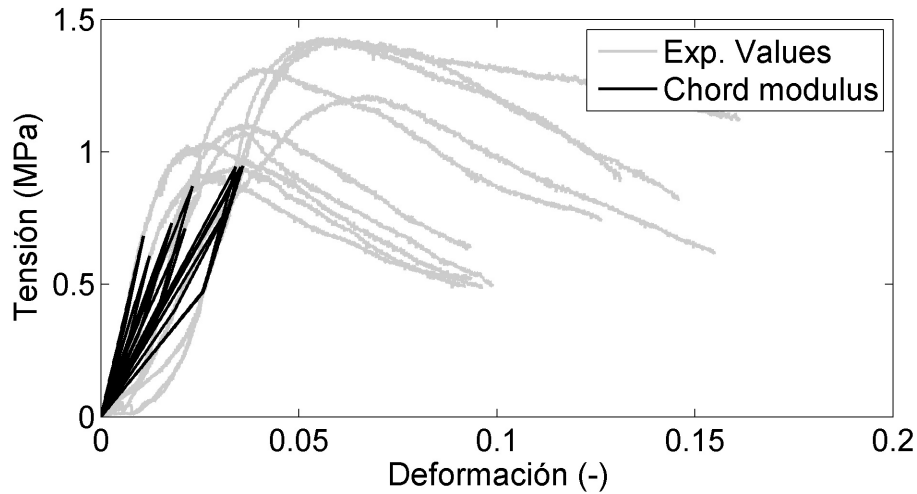
**Figura 4.2** Valor de la deformación pico ( $\epsilon_k$ ) para todas las probetas cúbicas ensayadas a compresión simple en campañas anteriores. Color azul: Posición transversal, 1 mes. Color rojo: Posición transversal, 6 meses. Color verde: Posición longitudinal, 6 meses. Color celeste: Posición transversal, 1 año. Color magenta: Posición longitudinal, 1 año.



**Figura 4.3** Valor del módulo de elasticidad ( $E_{medio}$ ) para todas las probetas cúbicas ensayadas a compresión simple en campañas anteriores. Color azul: Posición transversal, 1 mes. Color rojo: Posición transversal, 6 meses. Color verde: Posición longitudinal, 6 meses. Color celeste: Posición transversal, 1 año. Color magenta: Posición longitudinal, 1 año.

En la figura 4.4 se muestra, sobre las curvas tensión-deformación para las diez probetas cúbicas ensayadas

(en color grisáceo), el módulo de elasticidad medio ( $E_{medio}$ ), tangente a 1/3 ( $E_{1/3}$ ) y tangente a 2/3 ( $E_{2/3}$ ) también para cada una de las diez probetas cúbicas ensayadas en esta campaña de ensayos, en color negro.



**Figura 4.4** Módulo de elasticidad medio ( $E_{medio}$ ), tangente a 1/3 ( $E_{1/3}$ ) y tangente a 2/3 ( $E_{2/3}$ ) representado en color negro sobre las curvas tensión-deformación de los ensayos de probetas cúbicas en color grisáceo. Edad: 1 año.

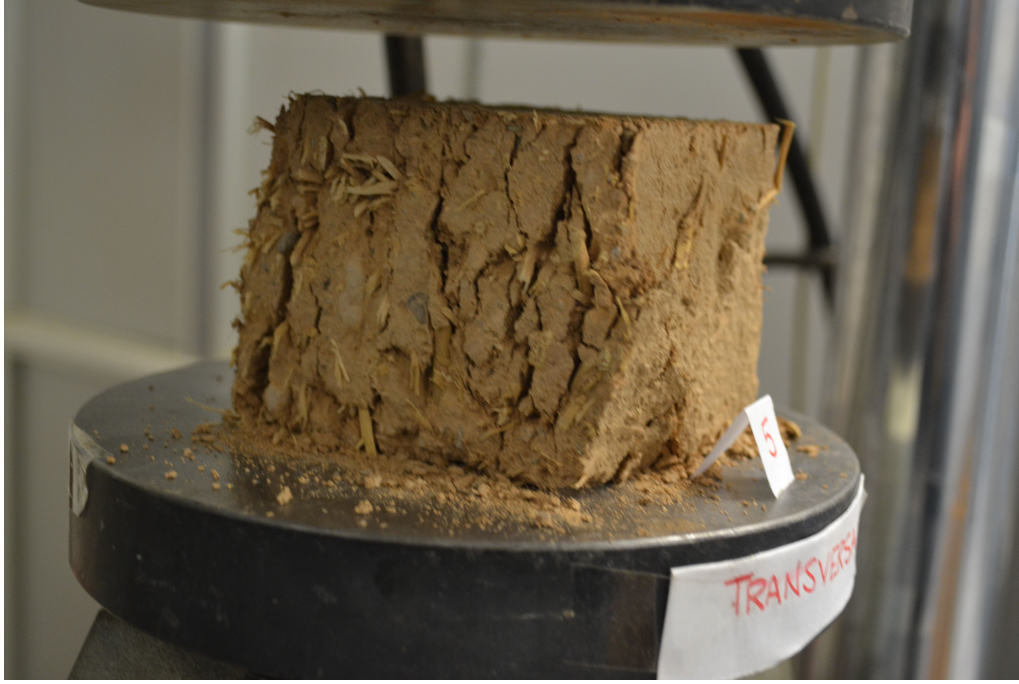
Debido a esa anisotropía del material se justifica gráficamente que en la figura 4.4, en la que se comparan las curvas tensión-deformación medias para las probetas cúbicas ensayadas en posición transversal y longitudinal, se obtengan mejores resultados para el módulo de elasticidad medio ( $E_{medio}$ ), tangente a 1/3 ( $E_{1/3}$ ) y tangente a 2/3 ( $E_{2/3}$ ) en las probetas ensayadas en posición transversal.

Posteriormente, en este mismo capítulo, se realizará una comparación más detallada entre las distintas propiedades del material obtenidas en los distintos ensayos, así como una comparación entre los resultados de las distintas campañas de ensayos o la forma de aplicación de la carga (ya sea longitudinal o transversal).

Las imágenes que se muestran a continuación demuestran lo comentado anteriormente acerca del tipo de fractura extensional que se ha obtenido en la rotura del material.



**Figura 4.5** Fractura de la probeta cúbica L2-L4 con aplicación de la carga en dirección longitudinal.



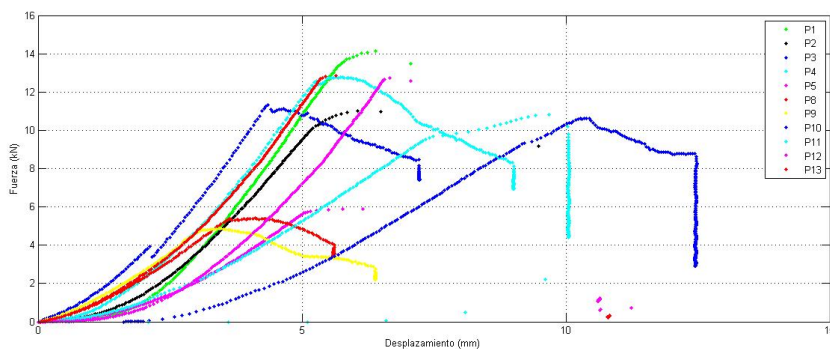
**Figura 4.6** Fractura de la L2-T5 probeta cúbica con aplicación de la carga en dirección transversal.

#### 4.1.2 Análisis de los ensayos de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas

Para estos ensayos no se han obtenido curvas tensión-deformación, sino que simplemente se ha calculado la tensión máxima de tracción indirecta, según se muestra en los diagramas de barras que representan en las figuras 3.17 y 3.18. Los valores de resistencia obtenidos arrojan como conclusión que la resistencia a la tracción indirecta ( $f_{tk}$ ) es del orden de una quinta parte de la resistencia de compresión simple,  $f_{ck}$ , que es del orden de 1/1.2 MPa. Además se aprecia que es independiente del tamaño de la probeta, puesto que los valores de resistencia a la tracción indirecta son muy parecidos en probetas grandes y pequeñas: en torno a 0.18 MPa. Del mismo modo ocurre con la dispersión, que es muy similar en ambos casos.

Esta similitud de resultados obtenidos para un tamaño y otro puede ser debida al factor de aspecto (cociente entre longitud y diámetro) utilizado en nuestras probetas cilíndricas, ya que es constante e igual a 2 para las probetas cilíndricas grandes (diámetro 150 mm) y del orden de 1.8 para las probetas cilíndricas pequeñas (diámetro 100 mm).

Las curvas fuerza-desplazamiento obtenidas de estos ensayos (figura 4.7) se caracterizan, al contrario de las curvas obtenidas para los ensayos de probetas cúbicas, por tener dos rampas lineales, una ascendente hasta la fuerza máxima y otra descendente desde ese mismo punto. Es en ese punto de fuerza máxima en el que aparece la grieta que produce el colapso de la probeta y en el cual también se ha calculado la resistencia a la tracción indirecta ( $f_{tk}$ ).



**Figura 4.7** Curvas fuerza-desplazamiento para las probetas cilíndricas en ensayos de tracción indirecta.



La fractura obtenida, según se aprecia en la figura 4.8, fue limpia en la mayoría de probetas, es decir, recorría la sección del cilindro desde una generatriz de aplicación de la carga hasta otra. Se podría destacar que en algún caso puntual se produjo deslizamiento en la rotura de la probeta, probablemente motivado por una incorrecta posición de la probeta, una aplicación de la carga no homogénea o debido a las oquedades existentes en la superficie de las probetas, según se expone en la figura 4.9.



**Figura 4.8** Fractura de una rotura a tracción limpia en un ensayo de tracción indirecta.



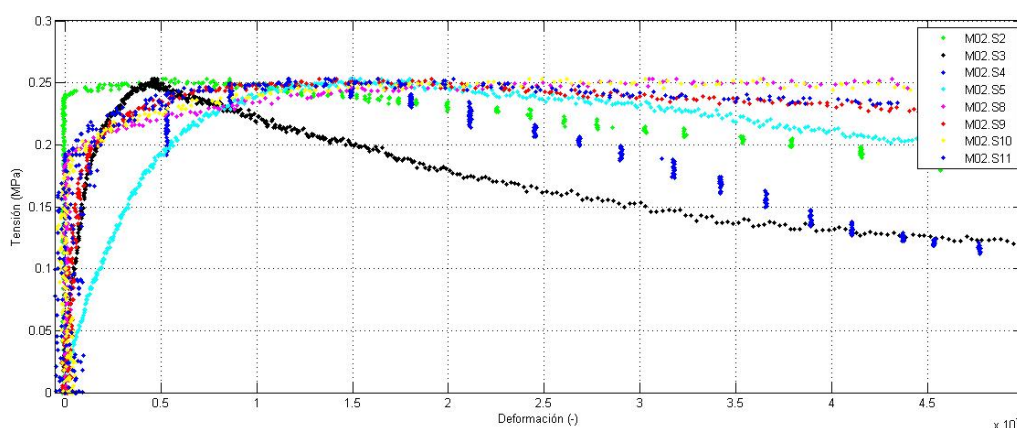
**Figura 4.9** Extensión de la fractura a lo largo de la probeta cilíndrica.



### 4.1.3 Análisis de los ensayos de compresión diagonal sobre muretes

Los ensayos de muretes presentan unas curvas tensión de cortante ( $\tau$ )-deformación de cortante ( $\gamma$ ) similares a las obtenidas en el caso de las probetas cúbicas ensayadas a compresión simple.

Se aprecia en la figura 4.10 la existencia de dispersión en la medición debido a la colocación de los sensores sobre pletinas. Esta dispersión se ha intentado aminorar con la colocación de tuercas que permitan un anclaje estable de las varillas a las pletinas, pero a pesar de ello se aprecia como sigue existiendo algo de dispersión remanente en todos los sensores, lo que distorsiona algunos resultados. En concreto, los resultados que más distorsión presentan son los correspondientes al muro M05.



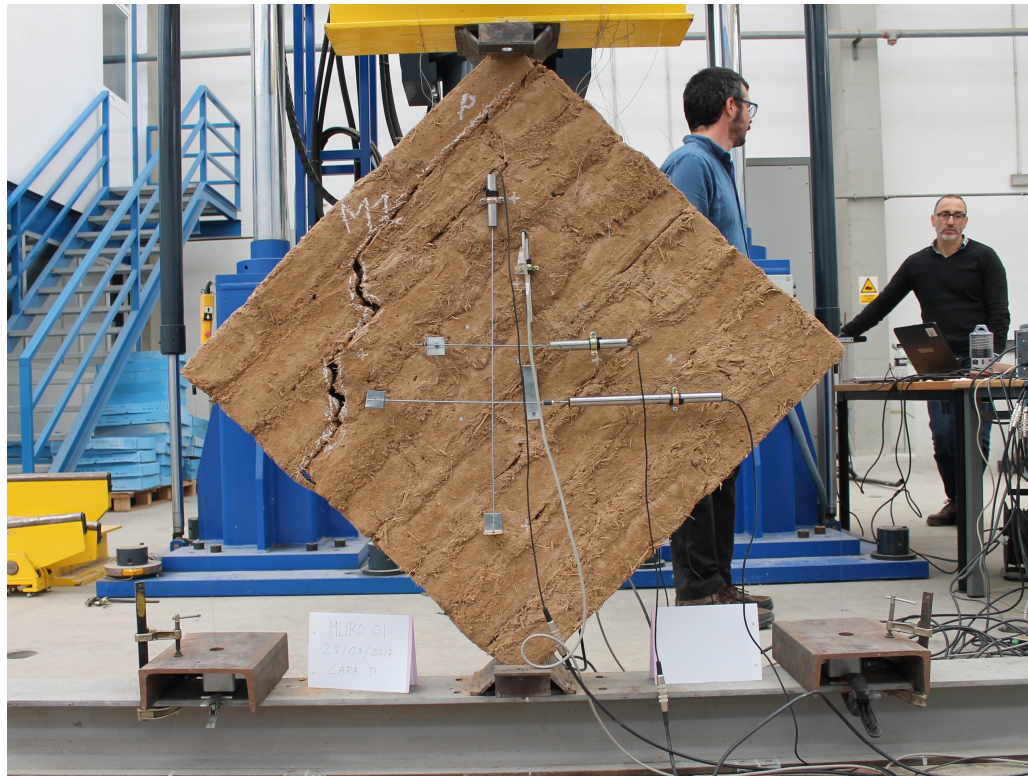
**Figura 4.10** Detalle de la curva tensión de cortante ( $\tau$ ) frente a deformación ( $\epsilon$ ) para el muro M02. La curva completa puede apreciarse en la figura 3.20.

Los sensores S6 y S7, correspondientes a los sensores tipo HBM no se han representado en la figura 4.10 debido a la gran dispersión que estos presentan. Ésta dispersión podría estar ocasionada por una incorrecta colocación de la varilla del sensor sobre la pletina o por un error interno del propio sensor.

Un factor muy importante que también debe tenerse en cuenta es el proceso de fabricación de las probetas. Según se haya compactado el material sufrirá mayores o menores deformaciones antes de llegar al límite de rotura. Esto se puede contrastar a través de los resultados obtenidos para los muretes fabricados con adobes del lote 1 (M02) y los que se fabricaron con adobes del lote 2 (resto de muretes): la deformación alcanzada por los muretes del lote 1 es mayor que la del resto de muretes, lo que nos invita a pensar que su compactación durante el proceso de fabricación fue mejor.

La fractura obtenida en estos ensayos también ha sido de tipo extensional en todos los muretes, a excepción del muro M01, cuya rotura se produjo por deslizamiento entre hiladas. En la figura 4.11 se muestra en detalle este tipo de rotura: la fractura nace en la parte superior del murete, justamente en el límite de la junta horizontal que une a las dos primeras hiladas de adobes y se extiende a través de dicha junta, hasta que, a través de una junta vertical, desciende hasta la siguiente junta horizontal a través de la cuál se sigue desarrollando.

En la figura 4.12 se muestra una representación de la fractura extensional para el muro M05, que evoluciona a través de la junta y del propio ladrillo, llegando hasta la base del murete. Éste es el tipo de fractura deseada, la cual se obtuvo en los ensayos de los muretes M02, M03, M04, M05 y M06.



**Figura 4.11** Fractura del ensayo de compresión diagonal para el muro M01.



**Figura 4.12** Fractura del ensayo de compresión diagonal para el muro M05.

Mostramos en las siguientes figuras el avance de la fractura en los distintos muretes M02, M03, M04, M05 y M06. Considerando que la velocidad de aplicación de la carga fue de 2 mm/min y que se tomaron fotografías cada 30 s, la diferencia de desplazamientos entre las imágenes que conforman las figuras 4.13-4.17 es de 1 mm. Las desarrollo de las imágenes que incluyen dichas figuras se produce de izquierda a derecha, de arriba hacia abajo.



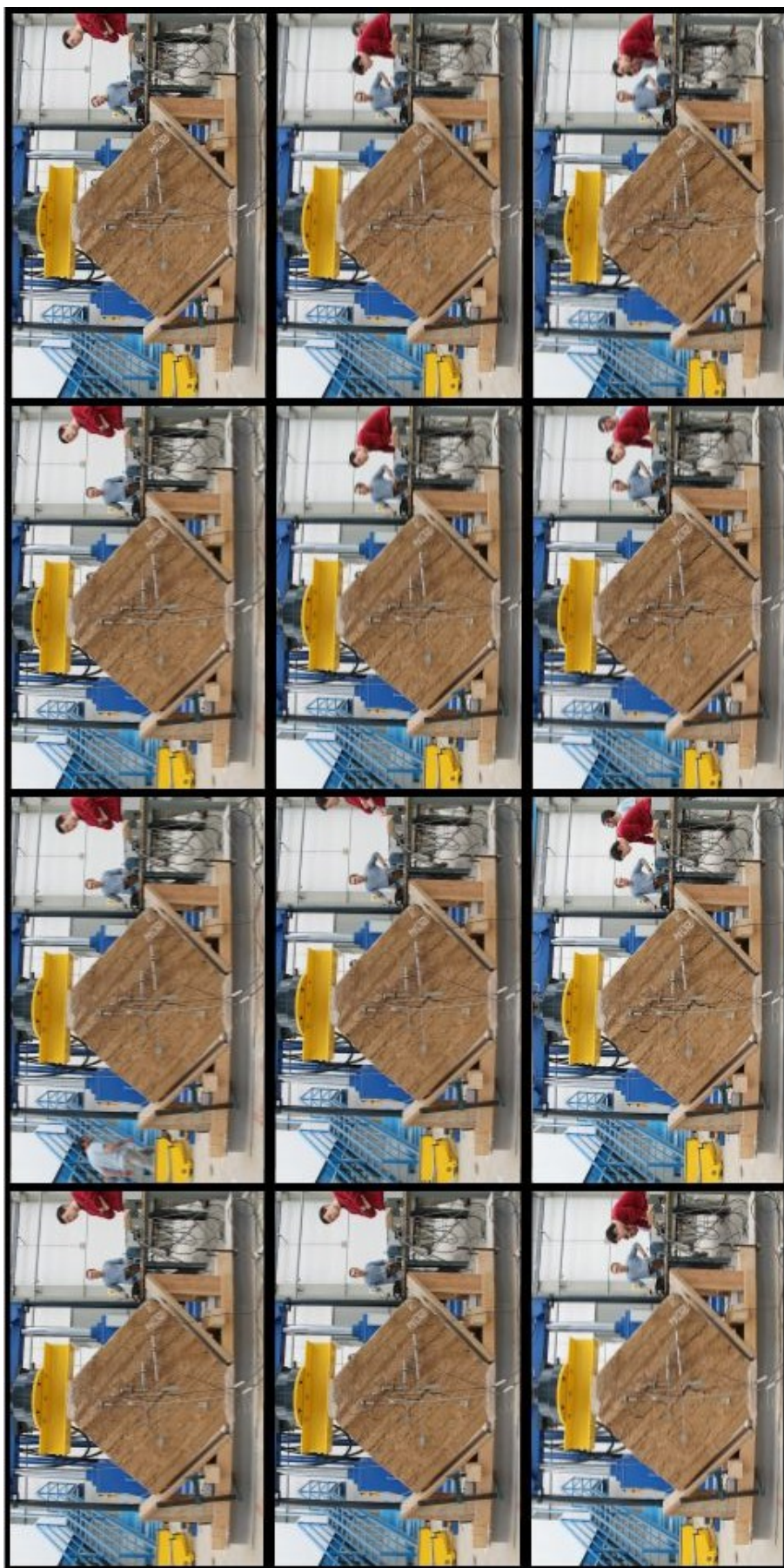
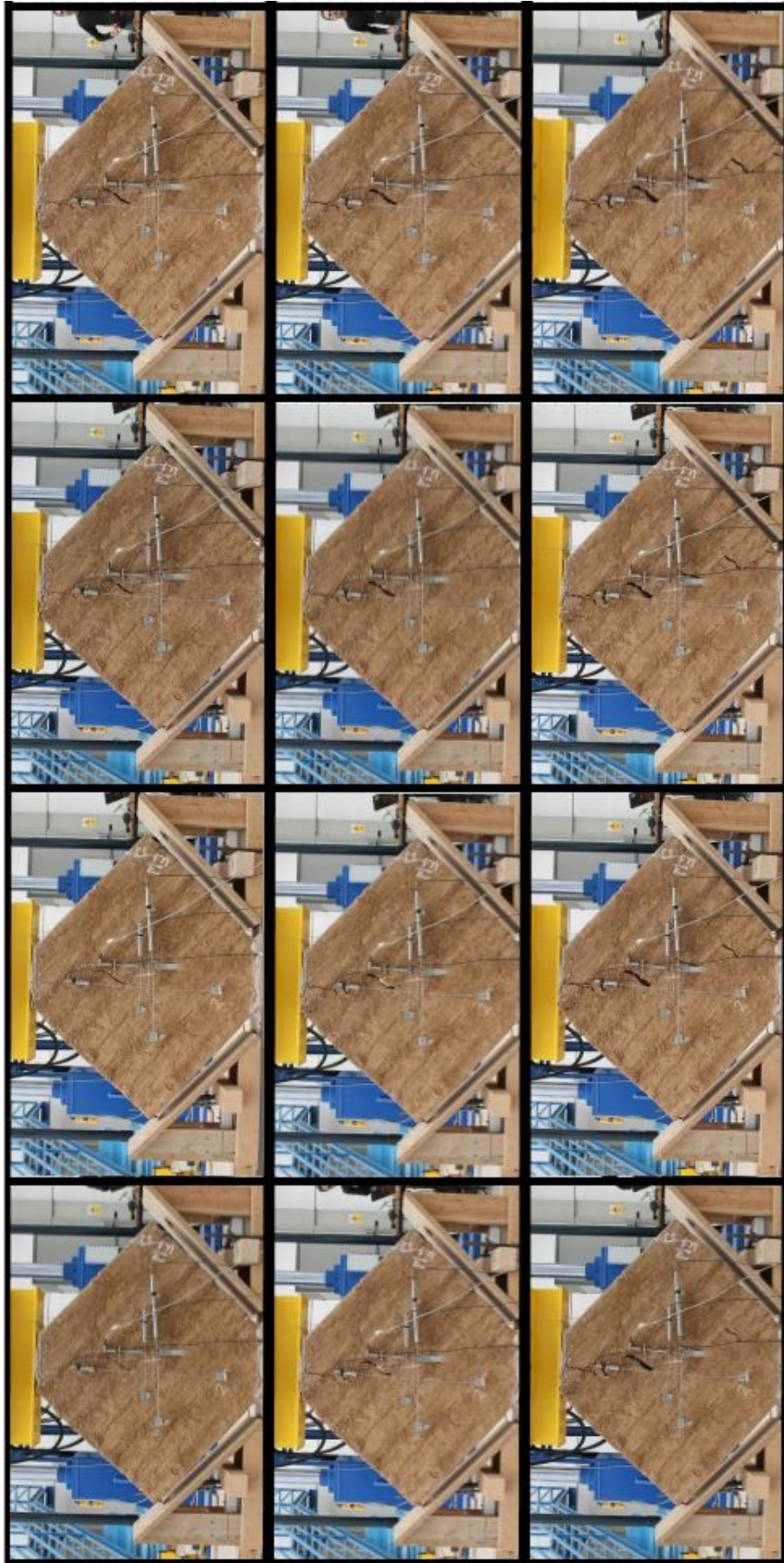


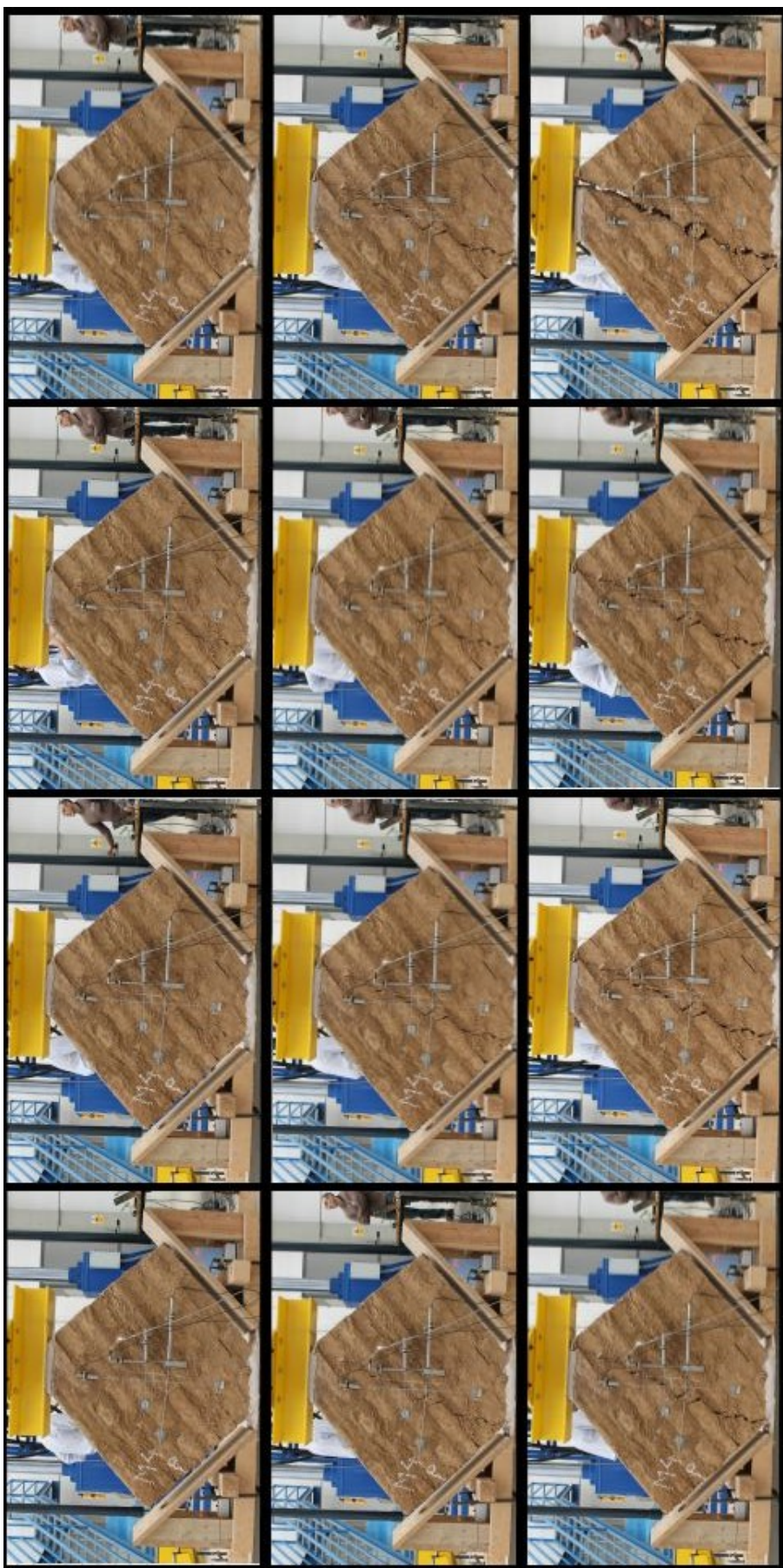
Figura 4.13 Avance de la fractura durante el ensayo del muro M02.





**Figura 4.14** Avance de la fractura durante el ensayo del muro M03.





**Figura 4.15** Avance de la fractura durante el ensayo del muro M04.



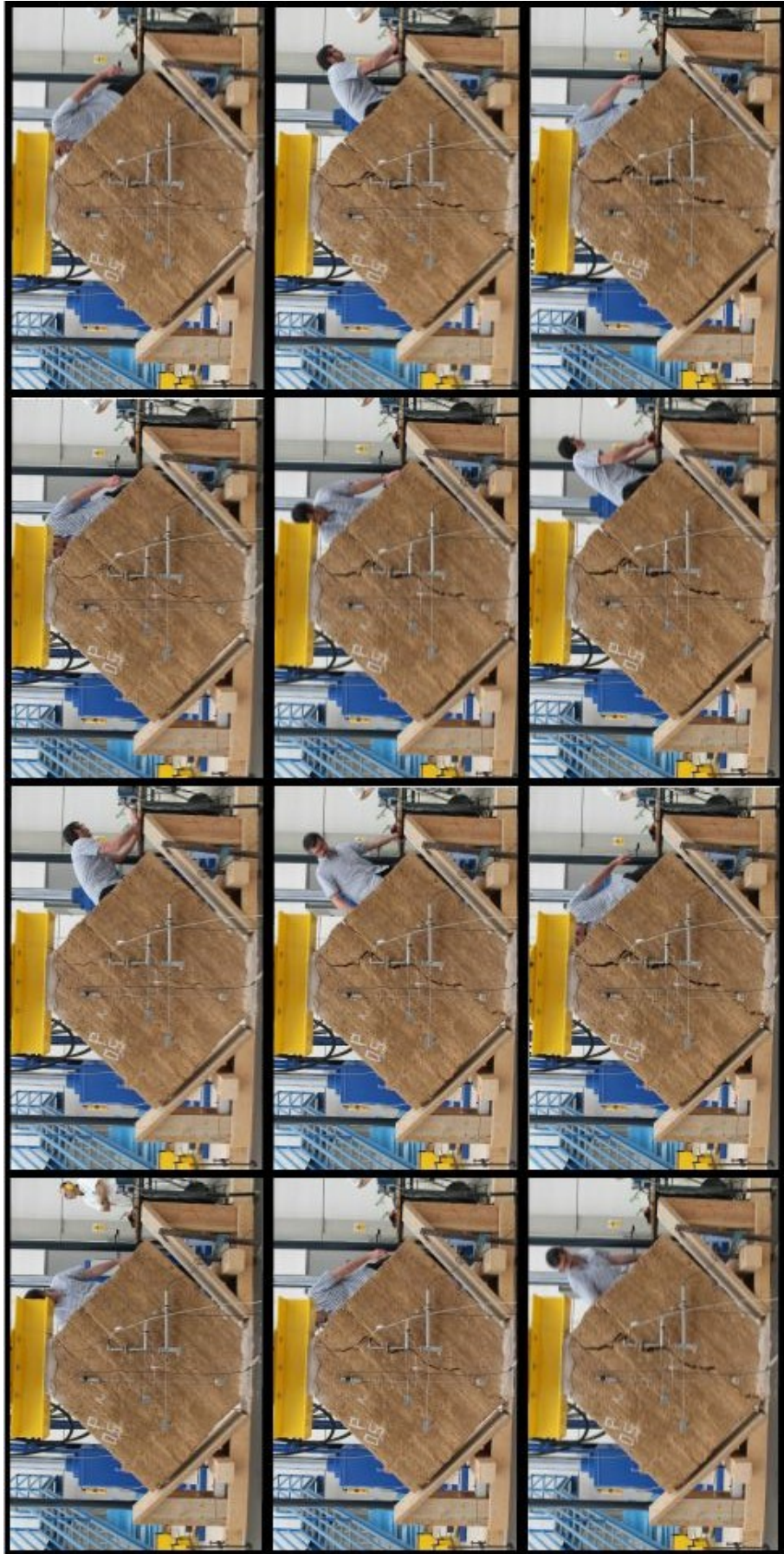


Figura 4.16 Avance de la fractura durante el ensayo del muro M05.



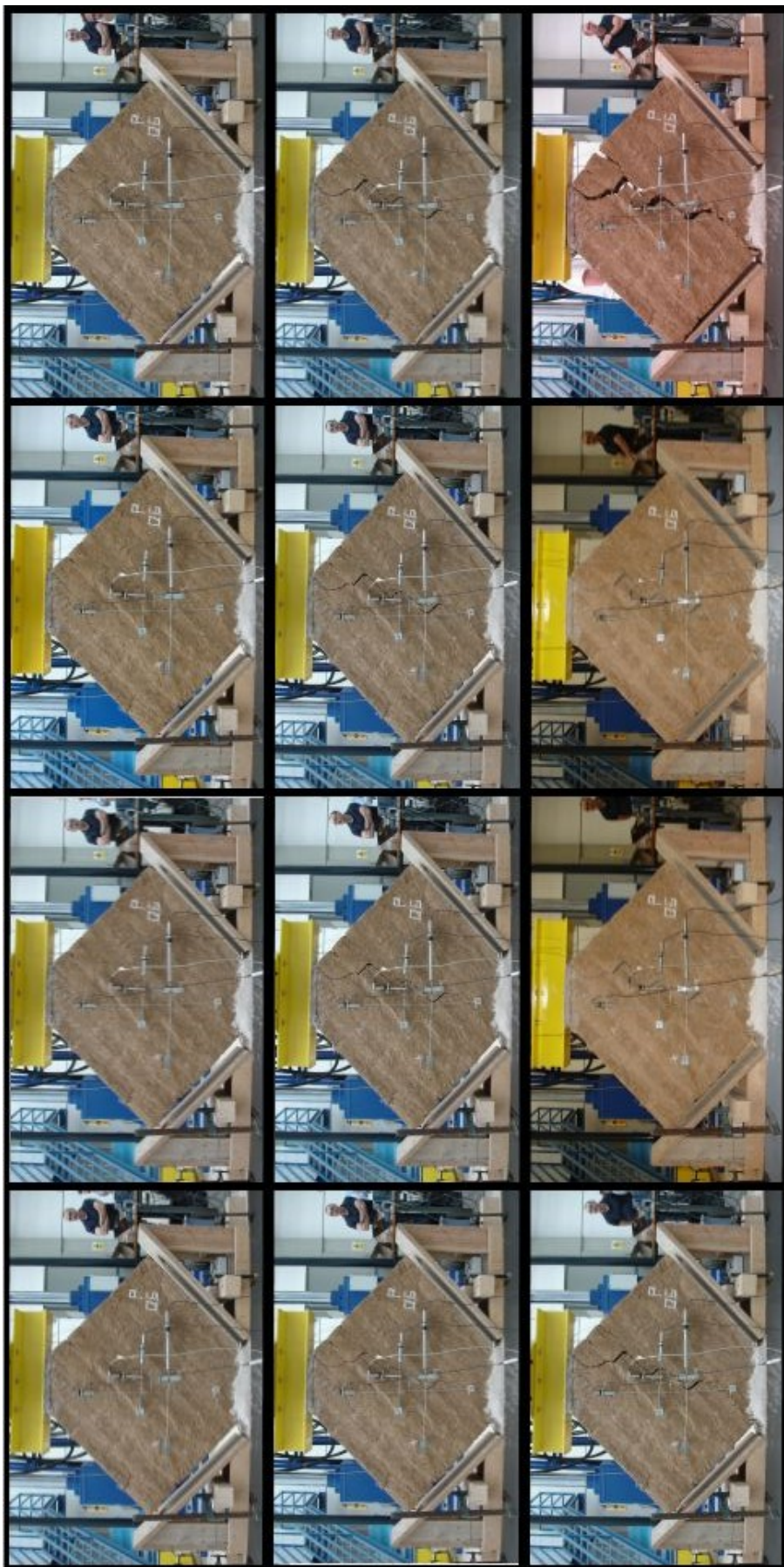


Figura 4.17 Avance de la fractura durante el ensayo del muro M06.

## 4.2 Comparación de las propiedades asociadas a la tipología del ensayos

Mostramos a continuación, de manera esquemática a través de distintas tablas, un resumen de las propiedades del material obtenidas de los distintos ensayos. Destacar que los resultados, que han sido promediados, facilitan de esta manera ser contrastados de forma cuantitativa.

### 4.2.1 Valores para los ensayos de compresión simple sobre probetas cúbicas.

**Tabla 4.1** Resistencia a compresión simple, deformación de pico y módulo de elasticidad obtenido para las probetas cúbicas en dirección transversal. Edad: 1 año. Unidades ensayadas: 5.

Unidad	$f_{ck}$ (MPa)	$\varepsilon_k$ (-)	$E_{medio}$ (MPa)	$E_{1/3}$ (MPa)	$E_{2/3}$ (MPa)
L2-L1	0.946	0.034	47.547	32.734	38.817
L2-L2	1.077	0.037	47.881	25.732	33.419
L2-L3	1.108	0.037	52.522	33.477	40.935
L2-L4	1.035	0.027	71.482	57.135	63.474
L2-L5	0.914	0.026	60.756	41.813	49.541
Media	1.016	0.032	56.036	38.177	45.237
Coef. Variación	8.22 %	17.00 %	18.10 %	31.52 %	25.93 %

**Tabla 4.2** Resistencia a compresión simple, deformación de pico y módulo de elasticidad obtenido para las probetas cúbicas en dirección longitudinal. Edad: 1 año. Unidades ensayadas: 5.

Unidad	$f_{ck}$ (MPa)	$\varepsilon_k$ (-)	$E_{medio}$ (MPa)	$E_{1/3}$ (MPa)	$E_{2/3}$ (MPa)
L2-T1	1.215	0.068	28.527	21.626	24.529
L2-T2	1.431	0.058	58.077	18.231	27.753
L2-T3	1.318	0.039	53.558	29.021	37.643
L2-T4	1.433	0.060	47.422	18.261	26.389
L2-T5	1.428	0.058	47.782	18.427	26.715
Media	1.365	0.056	47.273	21.115	28.618
Coef. Variación	7.09 %	19.12 %	23.88 %	22.02 %	18.07 %

**Tabla 4.3** Resistencia a compresión simple, deformación de pico y módulo de elasticidad obtenido para las probetas cúbicas en dirección transversal. Edad: 6 meses. Unidades ensayadas: 7.

Unidad	$f_{ck}$ (MPa)	$\varepsilon_k$ (-)	$E_{medio}$ (MPa)	$E_{1/3}$ (MPa)	$E_{2/3}$ (MPa)
Media	0.980	0.029	60.297	46.887	46.755
Coef. Variación	10.65 %	14.47 %	15.95 %	71.80 %	22.74 %

**Tabla 4.4** Resistencia a compresión simple, deformación de pico y módulo de elasticidad obtenido para las probetas cúbicas en dirección longitudinal. Edad: 6 meses. Unidades ensayadas: 7.

Unidad	$f_{ck}$ (MPa)	$\varepsilon_k$ (-)	$E_{medio}$ (MPa)	$E_{1/3}$ (MPa)	$E_{2/3}$ (MPa)
Media	1.135	0.060	33.214	20.767	25.486
Coef. Variación	17.35 %	17.03 %	33.49 %	29.44 %	30.86 %

**Tabla 4.5** Resistencia a compresión simple, deformación de pico y módulo de elasticidad obtenido para las probetas cúbicas en dirección transversal. Edad: 1 mes. Unidades ensayadas: 25.

Unidad	$f_{ck}$ (MPa)	$\varepsilon_k$ (-)	$E_{medio}$ (MPa)	$E_{1/3}$ (MPa)	$E_{2/3}$ (MPa)
Media	1.229	0.031	81.882	48.199	59.162
Coef. Variación	7.26 %	25.43 %	38.00 %	27.86 %	25.25 %

Donde el coeficiente de variación representa la relación entre la desviación típica y la media, en tanto por ciento:

$$\text{Coeficiente variación} = \frac{\text{Desviación típica}}{\text{Media}} \cdot 100$$

Para los ensayos de unidades cúbicas con un año de edad podemos concluir que los valores de resistencia a compresión simple ( $f_{ck}$ ), así como la deformación pico ( $\varepsilon_k$ ), son mayores para los ensayos realizados en dirección longitudinal que para los realizados en dirección transversal, es decir, el material se comporta mejor en una dirección que en otra, por lo que podemos reafirmarnos en las ideas que abogan por la anisotropía del adobe. Los valores de resistencia a compresión son del orden de un 30% y los de la deformación un 100% mayores en los ensayos en dirección longitudinal con respecto a los ensayos en dirección transversal, lo cual supone una diferencia muy notable.

Los valores para el módulo de elasticidad, ya sea  $E_{medio}$ ,  $E_{1/3}$  o  $E_{2/3}$ , en concordancia, son mayores para los ensayos en dirección transversal, ya que los valores para la deformación de pico son mucho más pequeños en proporción que los valores de la resistencia a compresión simple, según hemos comprobado en el párrafo anterior. De esta manera, y debido a que el módulo de elasticidad es un cociente en el que la deformación aparece en el denominador, se obtienen resultados mayores para los ensayos en dirección transversal.

Es destacable también la alta dispersión obtenida en algunos resultados, especialmente para la deformación de pico y el módulo de elasticidad. Esta dispersión puede ser debida al pequeño tamaño de las probetas cúbicas, lo cual permite que se maximice cualquier pequeña imperfección que exista sobre la probeta.

Si comparamos los resultados de probetas cúbicas con un año y con seis meses de edad apreciamos cierta continuidad en los resultados, obteniendo mayores valores de resistencia a compresión simple y deformación pico para las probetas cúbicas ensayadas en dirección longitudinal. Estos valores son un poco menores, para una aplicación de la carga en la misma dirección, para las probetas con seis meses de edad que para las que tienen un año. Esto nos invita a pensar que con el paso del tiempo, el material termina de secarse y de adquirir mejores comportamientos. Para las probetas ensayadas con seis meses de edad se obtuvieron unos valores de la dispersión similares a los descritos anteriormente, salvo para la resistencia a compresión simple, para la que se obtiene mayor dispersión en los resultados.

Por último, si comparamos los resultados para los ensayos con probetas cúbicas con un mes de edad (las cuales se ensayaron únicamente en dirección transversal) apreciamos algo llamativo con respecto a lo expuesto hasta ahora, y es que, los valores de la resistencia a la compresión simple ( $f_{ck}$ ) obtenidos son mayores para estas probetas que para el resto de probetas cúbicas ensayadas con mayor edad. Esto nos hace dudar de la posibilidad de que el material, con el paso del tiempo, pueda mejorar su comportamiento frente a cargas de compresión simple. Además, mientras que la deformación de pico presenta un valor muy parecido a los obtenidos con probetas de mayor edad, los valores para el módulo de elasticidad son, de nuevo, mayores que para el resto de probetas cúbicas ensayadas. La dispersión en estas probetas con un mes de edad son muy similares a las obtenidas para las probetas ensayadas en nuestra campaña de ensayos con un año de

edad, a excepción del módulo de elasticidad  $E_{medio}$ , que presenta una dispersión excepcionalmente, con un coeficiente de variación del 38 %.

El hecho de que se hayan ensayado más unidades de probetas cúbicas con un mes de edad que para el resto de edades, hace que a pesar de lo llamativo de los resultados, sean los resultados obtenidos para los ensayos de compresión con un mes de edad los más fiables.

#### 4.2.2 Valores para los ensayos de tracción indirecta sobre cilindros.

**Tabla 4.6** Resistencia a la tracción característica para los ensayos de tracción indirecta en probetas cilíndricas grandes (diámetro 150 mm).

Unidad	$f_{tk}$ (MPa)
P01G	0.200
P02G	0.157
P03G	0.177
P04G	0.182
P05G	0.182
P06G	0.150
P07G	0.153
P08G	0.180
Media	0.172
Coef. Variación	9.70 %

**Tabla 4.7** Resistencia a la tracción característica para los ensayos de tracción indirecta en probetas cilíndricas pequeñas (diámetro 100 mm).

Unidad	$f_{tk}$ (MPa)
P01S	0.227
P02S	0.164
P03S	0.189
P04S	0.188
P05S	0.175
Media	0.189
Coef. Variación	12.73 %

Para las propiedades de los ensayos de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas hemos obtenido unos resultados para la resistencia a tracción muy similares en los dos tipos de probetas ejecutadas en los ensayos. El valor de  $f_{tk}$  es del orden de 0.18 MPa en ambos con una dispersión aceptable, considerando el número total de probetas cilíndricas ensayadas, en torno al 10%. La diferencia de tamaño parece no mostrarse reflejada en los resultados, debido a que se decidió mantener el factor de forma (cociente entre la longitud y el diámetro) sobre las probetas cilíndricas ensayadas.

### 4.2.3 Valores para los ensayos de compresión diagonal sobre muretes.

A continuación se muestran los resultados de las propiedades mecánicas obtenidas para los ensayos de compresión diagonal sobre los muretes. Las propiedades de los muretes denominados en el capítulo anterior como muros M01 y M03 no se incluyen en la siguiente tabla debido a que los resultados obtenidos de la medición de los sensores no fueron satisfactorios ya que los valores obtenidos diferían mucho de la media para el resto de muretes. También se muestran los valores de la resistencia a la tracción en ensayos de compresión diagonal según la hipótesis descrita en el capítulo 3, para su posterior comparación y análisis.

Mostramos la tabla 4.8 con las propiedades obtenidas del ensayo de compresión diagonal descritas anteriormente. Los resultados que se muestran corresponden a los pares de sensores seleccionados según se detalló en el capítulo anterior.

**Tabla 4.8** Resistencia a la compresión diagonal  $\tau_{max}$ , deformación de cortante pico  $\gamma_k$ , módulo de rigidez  $G_{medio}$  y tensión de tracción indirecta  $\sigma_I$  para los pares de sensores seleccionados en los muretes ensayados a compresión simple.

Unidad	Sensores	$\tau_{max}$ (MPa)	$\gamma_k$ (-)	$G_{medio}$ (MPa)	$\sigma_I$ (MPa)
M02	3-9	0.2532	0.0045	408.714	0.2532
M02	5-11	0.2532	0.0040	293.737	0.2532
M02	3-11	0.2532	0.0031	513.528	0.2532
M02	5-9	0.2532	0.0054	256.161	0.2532
M04	3-9	0.2638	0.0021	261.266	0.2638
M04	4-10	0.2638	0.0015	591.949	0.2638
M04	5-11	0.2638	0.0011	623.787	0.2638
M04	3-11	0.2638	0.0012	566.799	0.2638
M04	4-8	0.2638	0.0022	319.441	0.2638
M04	5-9	0.2638	0.0021	272.751	0.2638
M05	3-9	0.2774	0.0090	385.005	0.2774
M04	5-11	0.2774	0.0085	310.292	0.2774
M05	3-11	0.2774	0.0079	361.220	0.2774
M05	5-9	0.2774	0.0096	327.681	0.2774
M06	2-8	0.2478	0.0019	310.179	0.2478
M06	3-9	0.2478	0.0022	271.615	0.2478
M06	4-10	0.2478	0.0014	389.675	0.2478
M06	5-11	0.2478	0.0013	332.300	0.2478
M06	2-10	0.2478	0.0012	556.509	0.2478
M06	3-11	0.2478	0.0012	352.445	0.2478
M06	4-8	0.2478	0.0021	250.422	0.2478
M06	5-9	0.2478	0.0022	259.492	0.2478
Media	-	0.2601	0.0034	373.408	0.1842
Coef. Variación	-	5.00 %	81.35 %	31.97 %	5.00 %

Los valores de las propiedades de la mampostería que se obtienen para estos ensayos a compresión diagonal presentan una gran dispersión según nos muestra el alto coeficiente de variación obtenido, tanto para los valores de la deformación de cortante máxima, como para los valores del módulo de rigidez, lo cual nos impide obtener ninguna conclusión definitiva. No obstante, sí que podemos comparar los valores de resistencia a la tracción obtenidos de los ensayos a compresión simple ( $\sigma_I$ ) y a tracción indirecta ( $f_{tk}$ ), llegando a la conclusión que dichos valores obtenidos en el primer caso son mayores que los obtenidos en el segundo caso. Cabe destacar que estos valores para la resistencia a la tracción presentados en la tabla 4.8 presentan un coeficiente de variación mucho más ajustado: esto es debido a la homogeneidad de los resultados obtenidos y a que para calcular la media y el coeficiente de variación sólo se ha considerado un valor de la resistencia a la tracción indirecta para cada murete (M02, M04, M05 y M06), ya que este valor es único para cada uno de esos muretes, de manera que los resultados no se mostraran falseados por la ponderación del número de muretes de un tipo sobre el total.

De esta manera, no podemos establecer una dependencia experimental entre la forma o el tamaño de la

probeta y el valor de la resistencia a la tracción del material. Del mismo modo, tampoco podemos esclarecer si los resultados realizados sobre mampostería son comparables con los resultados obtenidos sobre el propio material.

A modo de comparativa, se presenta también la tabla 4.9, con los valores de las propiedades del material obtenidas por otros autores en ensayos de compresión diagonal sobre muretes de adobe. Algunos de los resultados obtenidos, como el módulo de rigidez  $G_{medio}$  o la resistencia a compresión simple simple ( $f_{ck}$ ) son muy similares a los obtenidos en la campaña de ensayos realizada, como es el caso del primer autor que se muestra [18], aunque los valores que se muestran presentan una gran dispersión entre ellos. Sin embargo, los valores de resistencia a la compresión diagonal,  $\tau_{max}$ , obtenidos en nuestro caso son siempre mayores a los mostrados por los autores de la tabla 4.9.

**Tabla 4.9** Resistencia a compresión simple ( $f_{ck}$ ), módulo de rigidez ( $G_{medio}$ ) y tensión de cortante ( $\tau$ ) obtenidos por distintos autores [20] .

Autor	$f_{ck}$ (Mpa)	$(G_{medio})$ (Mpa)	$\tau_{max}$ (MPa)
Portugal (Varum et al., 2014)	0.47	413	0.03
México (Meli, 2005)	1.57	-	0.14
Colombia (Yamín et al., 2007)	2.84	27	0.03
Perú (San Bartolomé and Pehovaz, 2005)	2.94	-	0.11
Italia (Liberatore et al., 2006)	1.56	-	0.02
China (Wu et al., 2013)	1.66	-	-
Alemania (Gasparini et al., 2006)	2.14	105	0.12
Alemania (Röhlen et al., 2011)	2.15	-	-



## 5 Conclusiones y trabajos futuros

---

*"Los científicos no esperan que sus ideas avanzadas sean fácilmente aceptadas. Su deber es sentar las bases para aquellos que están por venir y señalar el camino". Nikola Tesla*

Como punto final a este trabajo aportamos las conclusiones más importantes e indicamos los próximos pasos dentro de las investigaciones sobre la caracterización del comportamiento del material.

Dada la incertidumbre que rodeaba la realización, por primera vez, de unos ensayos de compresión diagonal y tracción indirecta sobre mampostería de adobe con las características recogidas en este trabajo, junto con los buenos resultados obtenidos de los ensayos de compresión simple y tracción indirecta sobre probetas cúbicas y probetas cilíndricas respectivamente, podemos concluir que la campaña de ensayos realizada durante el primer semestre de 2017 en esta línea de investigación, ha sido muy satisfactoria. No obstante, no podemos olvidarnos de las dificultades que se experimentaron al comienzo de la misma, motivadas principalmente por la inexperiencia en estos tipos de ensayos y mostradas en los mejorables resultados del primer ensayo de compresión diagonal, lo que nos llevó a volver a plantear muchos aspectos de esta campaña de ensayos.

Otro escollo constante durante toda nuestra campaña de ensayos ha sido la ausencia de una normativa española estandarizada para la realización de ensayos sobre mampostería de adobe. Esto nos ha obligado a recurrir a normativas de otros países o normativas aplicables a otros materiales, como el hormigón. Aprovechamos para realizar un llamamiento a la estandarización de la normativa española para la mampostería de adobe después de comprobar que la dispersión obtenida en los resultados de los distintos ensayos realizados en esta campaña de ensayos es baja (en torno al 20%) y, por tanto, el material no se comporta de forma aleatoria ante cargas similares.

Si bien esta dispersión que comentamos es aceptable para llegar a una serie de conclusiones, no debemos pasar por el alto cuál es su origen y analizarlo para poder minimizar dicha dispersión. Tras analizar los resultados y la metodología empleada en los distintos ensayos, podemos llegar a la conclusión de que el propio material es la principal fuente de dispersión de nuestros resultados. El adobe utilizado en nuestra campaña de ensayos es un material de fabricación artesanal, por lo que, al no proceder de un proceso industrializado, existen gran cantidad de imperfecciones sobre cada una de las probetas.

Además, a este hecho se le une la elaboración, también artesanal, de los muretes, en los que la unión del mortero con el ladrillo o el propio trabado del murete desempeñan un papel importante en la transmisión de la carga dentro del murete. Una nueva campaña de ensayos con un trabado de los muretes diferentes o con un mortero de composición distinta a la del adobe ayudaría a determinar la influencia de estos factores sobre la dispersión de los resultados. No debemos olvidarnos de la influencia de la forma de aplicación de la carga sobre los resultados, según hemos comprobado en los ensayos de compresión diagonal, entre el ensayo del muro M01 y el resto de ensayos de muretes.

Conforme a los ensayos de unidades cúbicas a compresión simple, podemos esclarecer de forma definitiva la anisotropía del material, según nos muestran los resultados de los ensayos y las diferencias de valores de resistencia a compresión simple en torno al 30%. El origen de esta anisotropía se encuentra en la sedimentación por densidad del material, permitiendo que los materiales más densos se acumulen en la zona inferior de los adobes. También es importante la orientación de la paja dentro del adobe: ésta se orienta en dirección

perpendicular a la dirección de secado, confiriendo mejores resultados de resistencia a compresión simple para los ensayos en posición longitudinal.

Los resultados para los ensayos a compresión simple sobre probetas cúbicas han seguido la tendencia de los ensayos realizados en campañas previas y siguen demostrando la anisotropía del material. No obstante, los resultados obtenidos no muestran ninguna conclusión esclarecedora sobre la influencia del paso del tiempo sobre el material.

Para los ensayos de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas, realizados por primera vez en esta línea de investigación, se han obtenido una propiedad (resistencia a la tracción característica,  $f_{tk}$ ) que ha resultado de gran utilidad posteriormente para ser contrastada con los resultados obtenidos en los ensayos a compresión diagonal sobre muretes.

Observamos que los valores de resistencia a la tracción característica en ensayos de tracción indirecta para las probetas cilíndricas ( $f_{tk}$ ) son menores que los valores de resistencia a la tracción obtenidos para los ensayos de compresión diagonal sobre muretes ( $\sigma_I$ ). Con ello descartamos la influencia de la forma de probeta sobre las propiedades del material, incluso a través de la mampostería.

La ejecución de los ensayos de compresión diagonal sobre, también por primera vez en esta línea de investigación, aporta los primeros resultados que posteriormente podrán ser contrastados con campaña de ensayos experimentales que mejoren las técnicas utilizadas en este trabajo y profundicen en el estudio de la mampostería hasta poder caracterizarla completamente.

La tesis doctoral de D. José Daniel Rodríguez Mariscal, bajo la tutela de D. Mario Solís Muñoz, continuará con su objetivo de caracterizar experimental y analíticamente el comportamiento mecánico del adobe a través de futuras campañas de ensayos sobre muretes y unidades individuales de adobe, para con ello conseguir un modelo numérico que caracterice el comportamiento de la mampostería de adobe y así asentar las bases del estudio de la mampostería de adobe.

Siguiendo con la línea de investigación de la Escuela Técnica de Ingeniería de la Universidad de Sevilla también se valora como una posibilidad futura la ejecución de muretes de adobe con una geomalla de recubrimiento. La mejora del comportamiento de este tipo de estructuras con dicha geomalla ya ha sido corroborada por investigaciones de la Pontificia Universidad Católica de Perú [10]. También se estudia la posibilidad de llevar a cabo campañas experimentales para determinar la influencia del tamaño de los muretes sobre el comportamiento de la mampostería o para estudiar la caracterización de la junta de unión.

## Anexo A

---

**E**n el siguiente anexo mostramos las fichas con todos los datos de cada uno de los ensayos de muretes que se han llevado a cabo durante la campaña experimental de ensayos que abarca este trabajo.

En ellas se muestra información útil para el análisis de los ensayos de compresión diagonal, como información sobre la ejecución de los ensayos, la velocidad y tipo de aplicación de la carga, la geométrica de las probetas utilizadas o la distancia entre los puntos de anclaje de los sensores, fundamental para la obtención de los resultados y el posterior análisis mostrado en los capítulos 3 y 4.



## ENSAYO MURETE

ENSAYO: 170328\_M01 NUM. ORDEN: 1º

FECHA: 28/03/2017 HORA: 16:50 MÁQUINA DE ENSAYO: Pórtico rincipal

Nº ESPECIMEN: 01 // MURETE // LOTE 1

DIAGONAL HORIZONTAL: 122 // DIAGONAL VERTICAL: 122

DIMENSIONES: 88x87.5x18 [HxWxT]cm // APOYO: 0

CONTROL: ☐ FUERZ. ☒ DESPL. // FRECUENCIA ADQUISICIÓN DATOS: 177 datos/min

Nº CARGAS: 2 // OBSERVACIONES:

### CARGA 01.

TIPO CARGA: Rampa PUNTO FINAL: 0-13.6 VEL. CARGA: 1 mm/min

### CARGA 02.

TIPO CARGA: Rampa PUNTO FINAL: 0- VEL. CARGA: 1 mm/min

### CARGA 03.

TIPO CARGA: PUNTO FINAL: VEL. CARGA:

### CARGA 04.

TIPO CARGA: PUNTO FINAL: VEL. CARGA:

### CARGA 05.

TIPO CARGA: PUNTO FINAL: VEL. CARGA:

### OBSERVACIONES GENERALES:

Precarga de 30 kg en M01 de la máquina.  
Carga para el murete 01.1 (resto del murete 01):  
Precarga de 190kg en M01.1 de la máquina.

SENSOR 01	TIPO: A-V-C (HBM-2)		
RANGO: 20	LONG. EXTREMOS: 280	PENDIENTE: 2.114	
SENSOR 02	TIPO: A-V-L (J3544)		
RANGO: 12	LONG. EXTREMOS: 570	PENDIENTE: 0.659	
SENSOR 03	TIPO: P-V-C (HBM-1)		
RANGO: 20	LONG. EXTREMOS: 265	PENDIENTE: 2.1218	
SENSOR 04	TIPO: P-V-L (J3545)		
RANGO: 12	LONG. EXTREMOS: 615	PENDIENTE: 0.658	
SENSOR 05	TIPO: Poten A		
RANGO: 780	LONG. EXTREMOS: 370	PENDIENTE: 7	
SENSOR 06	TIPO: Poten B		
RANGO: 780	LONG. EXTREMOS: 325	PENDIENTE: 7	
SENSOR 07	TIPO: A-H-C (J3602)		
RANGO: 24	LONG. EXTREMOS: 295	PENDIENTE: 1.267	
SENSOR 08	TIPO: A-H-L (J3616)		
RANGO: 50	LONG. EXTREMOS: 600	PENDIENTE: 2.502	
SENSOR 09	TIPO: P-H-C (J3746)		
RANGO: 24	LONG. EXTREMOS: 290	PENDIENTE: 1.244	
SENSOR 10	TIPO: PHL SANGAMO		
RANGO: 100	LONG. EXTREMOS: 550	PENDIENTE: 5.025	



## ENSAYO MURETE

ENSAYO: 170404\_M02 NUM. ORDEN: 2º

FECHA: 04/04/2014 HORA: 16:00 MÁQUINA DE ENSAYO: Pórtico principal

Nº ESPECIMEN: 02 // MURETE // LOTE 1

DIAGONAL HORIZONTAL: 1220 mm // DIAGONAL VERTICAL: 970 mm

DIMENSIONES: 87.5x89x18 [HxWxT]cm // APOYO: 290 mm/250 mm

CONTROL: ☐ FUERZ. ☒ DESPL. // FRECUENCIA ADQUISICIÓN DATOS: 177 datos/min

Nº CARGAS: 1 // OBSERVACIONES:

### CARGA 01.

TIPO CARGA: Rampa PUNTO FINAL: 0- VEL. CARGA: 2 mm/min

### CARGA 02.

TIPO CARGA: PUNTO FINAL: VEL. CARGA:

### CARGA 03.

TIPO CARGA: PUNTO FINAL: VEL. CARGA:

### CARGA 04.

TIPO CARGA: PUNTO FINAL: VEL. CARGA:

### CARGA 05.

TIPO CARGA: PUNTO FINAL: VEL. CARGA:

OBSERVACIONES GENERALES:



SENSOR 01	TIPO: A-V-C (HBM2)		
RANGO: 20	LONG. EXTREMOS: 270	PENDIENTE: 2.114	
SENSOR 02	TIPO: A-V-L (J3544)		
RANGO: 12	LONG. EXTREMOS: 575	PENDIENTE: 0.659	
SENSOR 03	TIPO: P-V-C (HBM1)		
RANGO: 20	LONG. EXTREMOS: 290	PENDIENTE: 2.1218	
SENSOR 04	TIPO: P-V-L (J3545)		
RANGO: 12	LONG. EXTREMOS: 615	PENDIENTE: 0.658	
SENSOR 05	TIPO: POTEN A		
RANGO: 780	LONG. EXTREMOS: 375	PENDIENTE: 79.365	
SENSOR 06	TIPO: POTEN B		
RANGO: 780	LONG. EXTREMOS: 320	PENDIENTE: 79.365	
SENSOR 07	TIPO: A-H-C (J3602)		
RANGO: 24	LONG. EXTREMOS: 290	PENDIENTE: 1.267	
SENSOR 08	TIPO: A-H-L (J3616)		
RANGO: 50	LONG. EXTREMOS: 590	PENDIENTE: 2.502	
SENSOR 09	TIPO: P-H-C (J3746)		
RANGO: 24	LONG. EXTREMOS: 280	PENDIENTE: 1.244	
SENSOR 10	TIPO: P-H-L SANGAM		
RANGO: 100	LONG. EXTREMOS: 540	PENDIENTE: 5.025	



## ENSAYO MURETE

ENSAYO: 170407\_M03 NUM. ORDEN: 3º

FECHA: 07/04/2017 HORA: 16:00 MÁQUINA DE ENSAYO: Pórtico principal

Nº ESPECIMEN: M03 // MURETE // LOTE 2

DIAGONAL HORIZONTAL: 120 cm // DIAGONAL VERTICAL: 121 cm

DIMENSIONES: 87.5x87.5x17.5 [HxWxT]cm // APOYO: Abajo 31/Arriba 29

CONTROL: ☐ FUERZ. ☒ DESPL. // FRECUENCIA ADQUISICIÓN DATOS: 177 datos/min

Nº CARGAS: 1 // OBSERVACIONES: -

### CARGA 01.

TIPO CARGA: Rampa PUNTO FINAL: 0- VEL. CARGA: 2mm/min

### CARGA 02.

TIPO CARGA: PUNTO FINAL: VEL. CARGA:

### CARGA 03.

TIPO CARGA: PUNTO FINAL: VEL. CARGA:

### CARGA 04.

TIPO CARGA: PUNTO FINAL: VEL. CARGA:

### CARGA 05.

TIPO CARGA: PUNTO FINAL: VEL. CARGA:

### OBSERVACIONES GENERALES:

-

SENSOR 01	TIPO: A-V-C HBM2		
RANGO: 20	LONG. EXTREMOS: 270	PENDIENTE: 2.114	
SENSOR 02	TIPO: A-V-L J3544		
RANGO: 12	LONG. EXTREMOS: 530	PENDIENTE: 0.659	
SENSOR 03	TIPO: P-V-C HBM1		
RANGO: 20	LONG. EXTREMOS: 280	PENDIENTE: 2.1218	
SENSOR 04	TIPO: P-V-L J3545		
RANGO: 12	LONG. EXTREMOS: 510	PENDIENTE: 0.558	
SENSOR 05	TIPO: POTEN A		
RANGO: 780	LONG. EXTREMOS: 340	PENDIENTE: 79.365	
SENSOR 06	TIPO: POTEN B		
RANGO: 780	LONG. EXTREMOS: 310	PENDIENTE: 79.365	
SENSOR 07	TIPO: A-H-C J3602		
RANGO: 24	LONG. EXTREMOS: 290	PENDIENTE: 1.267	
SENSOR 08	TIPO: A-H-L J3616		
RANGO: 50	LONG. EXTREMOS: 570	PENDIENTE: 2.502	
SENSOR 09	TIPO: P-H-C J3746		
RANGO: 24	LONG. EXTREMOS: 295	PENDIENTE: 1.244	
SENSOR 10	TIPO: PHL SANGAMO		
RANGO: 100	LONG. EXTREMOS: 545	PENDIENTE: 5.025	



## ENSAYO MURETE

ENSAYO: 170417\_M04 NUM. ORDEN: 4º

FECHA: 17/14/2017 HORA: 11:30 MÁQUINA DE ENSAYO: Pórtico principal

Nº ESPECIMEN: 04 // MURETE // LOTE 2

DIAGONAL HORIZONTAL: 120 // DIAGONAL VERTICAL: 121

DIMENSIONES: 85.5x87.5x18 [HxWxT]cm // APOYO: Abajo 27//Arriba 24

CONTROL: ☐ FUERZ. ☒ DESPL. // FRECUENCIA ADQUISICIÓN DATOS: 176

Nº CARGAS: 1 // OBSERVACIONES: -

### CARGA 01.

TIPO CARGA: Rampa PUNTO FINAL: - VEL. CARGA: 2 mm/min

### CARGA 02.

TIPO CARGA: PUNTO FINAL: VEL. CARGA:

### CARGA 03.

TIPO CARGA: PUNTO FINAL: VEL. CARGA:

### CARGA 04.

TIPO CARGA: PUNTO FINAL: VEL. CARGA:

### CARGA 05.

TIPO CARGA: PUNTO FINAL: VEL. CARGA:

OBSERVACIONES GENERALES:

SENSOR 01	TIPO: A-V-C HBM-2		
RANGO: 20	LONG. EXTREMOS: 275	PENDIENTE: 2.114	
SENSOR 02	TIPO: A-V-L J3544		
RANGO: 12	LONG. EXTREMOS: 555	PENDIENTE: 0.659	
SENSOR 03	TIPO: P-V-C HBM-1		
RANGO: 20	LONG. EXTREMOS: 290	PENDIENTE: 2.1218	
SENSOR 04	TIPO: P-V-L J3545		
RANGO: 12	LONG. EXTREMOS: 620	PENDIENTE: 0.658	
SENSOR 05	TIPO: POTEN A		
RANGO: 780	LONG. EXTREMOS: 305	PENDIENTE: 79.365	
SENSOR 06	TIPO: POTEN B		
RANGO: 780	LONG. EXTREMOS: 345	PENDIENTE: 79.365	
SENSOR 07	TIPO: A-H-C J3602		
RANGO: 24	LONG. EXTREMOS: 290	PENDIENTE: 1.267	
SENSOR 08	TIPO: A-H-L J3616		
RANGO: 50	LONG. EXTREMOS: 590	PENDIENTE: 2.502	
SENSOR 09	TIPO: P-H-C J3746		
RANGO: 24	LONG. EXTREMOS: 290	PENDIENTE: 1.244	
SENSOR 10	TIPO: P-H-LSANGAMC		
RANGO: 100	LONG. EXTREMOS: 540	PENDIENTE: 5.025	



## ENSAYO MURETE

ENSAYO: 170418\_M05 NUM. ORDEN: 5°

FECHA: 18/04/2017 HORA: 13:00 MÁQUINA DE ENSAYO: Pórtico principal

Nº ESPECIMEN: 05 // MURETE // LOTE 2

DIAGONAL HORIZONTAL: 121 // DIAGONAL VERTICAL: 122

DIMENSIONES: 87.5x87.5x17.5 [HxWxT]cm // APOYO: Arriba 28//Abajo 30

CONTROL: ☐ FUERZ. ☒ DESPL. // FRECUENCIA ADQUISICIÓN DATOS: 176

Nº CARGAS: - // OBSERVACIONES: -

### CARGA 01.

TIPO CARGA: Rampa PUNTO FINAL: - VEL. CARGA: 2 mm/min

### CARGA 02.

TIPO CARGA: PUNTO FINAL: VEL. CARGA:

### CARGA 03.

TIPO CARGA: PUNTO FINAL: VEL. CARGA:

### CARGA 04.

TIPO CARGA: PUNTO FINAL: VEL. CARGA:

### CARGA 05.

TIPO CARGA: PUNTO FINAL: VEL. CARGA:

OBSERVACIONES GENERALES:



SENSOR 01	TIPO: A-V-C HBM2		
RANGO: 20	LONG. EXTREMOS: 280	PENDIENTE: 2.114	
SENSOR 02	TIPO: A-V-L J3544		
RANGO: 12	LONG. EXTREMOS: 570	PENDIENTE: 0.659	
SENSOR 03	TIPO: P-V-C HBM1		
RANGO: 20	LONG. EXTREMOS: 265	PENDIENTE: 2.1218	
SENSOR 04	TIPO: P-V-L J3545		
RANGO: 12	LONG. EXTREMOS: 630	PENDIENTE: 0.658	
SENSOR 05	TIPO: POTEN A		
RANGO: 780	LONG. EXTREMOS: 380	PENDIENTE: 79.365	
SENSOR 06	TIPO: POTEN B		
RANGO: 780	LONG. EXTREMOS: 330	PENDIENTE: 79.365	
SENSOR 07	TIPO: A-H-C J3602		
RANGO: 24	LONG. EXTREMOS: 295	PENDIENTE: 1.267	
SENSOR 08	TIPO: A-H-L J3616		
RANGO: 50	LONG. EXTREMOS: 620	PENDIENTE: 2.502	
SENSOR 09	TIPO: P-H-C J3746		
RANGO: 24	LONG. EXTREMOS: 300	PENDIENTE: 1.244	
SENSOR 10	TIPO: P-H-L SANGAMI		
RANGO: 100	LONG. EXTREMOS: 550	PENDIENTE: 5.025	



## ENSAYO MURETE

ENSAYO: 170419\_M06 NUM. ORDEN: 6°

FECHA: 19/04/2017 HORA: 14:00 MÁQUINA DE ENSAYO: Pórtico principal

Nº ESPECIMEN: 06 // MURETE // LOTE 2

DIAGONAL HORIZONTAL: 124 // DIAGONAL VERTICAL: 123

DIMENSIONES: 87.5x87.5x18 [HxWxT]cm // APOYO: Arriba 26 // Abajo 27

CONTROL: ☐ FUERZ. ☒ DESPL. // FRECUENCIA ADQUISICIÓN DATOS: 177

Nº CARGAS: 1 // OBSERVACIONES: -

### CARGA 01.

TIPO CARGA: Rampa PUNTO FINAL: - VEL. CARGA: 2 mm/min

### CARGA 02.

TIPO CARGA: PUNTO FINAL: VEL. CARGA:

### CARGA 03.

TIPO CARGA: PUNTO FINAL: VEL. CARGA:

### CARGA 04.

TIPO CARGA: PUNTO FINAL: VEL. CARGA:

### CARGA 05.

TIPO CARGA: PUNTO FINAL: VEL. CARGA:

### OBSERVACIONES GENERALES:

Distancia entre apoyos

SENSOR 01	TIPO: A-V-C HBM2		
RANGO: 20	LONG. EXTREMOS: 330	PENDIENTE: 2.114	
SENSOR 02	TIPO: A-V-L J3544		
RANGO: 12	LONG. EXTREMOS: 560	PENDIENTE: 0.659	
SENSOR 03	TIPO: P-V-C HBM1		
RANGO: 20	LONG. EXTREMOS: 270	PENDIENTE: 2.1218	
SENSOR 04	TIPO: P-V-L J3545		
RANGO: 12	LONG. EXTREMOS: 640	PENDIENTE: 0.658	
SENSOR 05	TIPO: POTEN A		
RANGO: 780	LONG. EXTREMOS: 360	PENDIENTE: 79.365	
SENSOR 06	TIPO: POTEN B		
RANGO: 780	LONG. EXTREMOS: 325	PENDIENTE: 79.365	
SENSOR 07	TIPO: A-H-C J3602		
RANGO: 24	LONG. EXTREMOS: 325	PENDIENTE: 1.267	
SENSOR 08	TIPO: A-H-L J3616		
RANGO: 50	LONG. EXTREMOS: 615	PENDIENTE: 2.502	
SENSOR 09	TIPO: P-H-C J3746		
RANGO: 24	LONG. EXTREMOS: 300	PENDIENTE: 1.244	
SENSOR 10	TIPO: P-H-L SANGAMI		
RANGO: 100	LONG. EXTREMOS: 560	PENDIENTE: 5.025	

## Anexo B

En el presente anexo se muestran los resultados para las propiedades mecánicas del material obtenidas en dos campañas previas de ensayos de compresión simple sobre probetas cúbicas y que se han utilizado para ser comparados con los resultados obtenidos en la campaña de ensayos de compresión simple sobre probetas cúbicas ejecutada con objeto de este trabajo.

**Tabla 5.1** Resistencia a compresión simple ( $f_{ck}$ ), deformación de pico ( $\varepsilon_k$ ) y módulo de elasticidad  $E_{medio}$ ,  $E_{1/3}$  y  $E_{2/3}$  obtenido para las probetas cúbicas ensayadas a compresión simple en dirección transversal. Edad: 1 mes.

Unidad	$f_{ck}$ (MPa)	$\varepsilon_k$ (-)	$E_{medio}$ (MPa)	$E_{1/3}$ (MPa)	$E_{2/3}$ (MPa)
1	1.128	0.029	84.268	26.614	40.204
2	1.368	0.030	103.276	47.649	65.189
3	1.217	0.026	92.141	36.874	52.729
4	1.472	0.031	87.485	52.972	66.160
5	1.191	0.033	90.679	47.843	62.704
6	1.265	0.027	89.810	57.440	69.970
7	1.127	0.024	96.594	41.559	58.070
8	1.123	0.030	74.983	46.987	57.733
9	1.126	0.037	56.556	44.658	49.889
10	1.226	0.032	67.454	56.217	61.345
11	1.175	0.032	82.306	53.318	64.728
12	1.116	0.021	98.117	72.454	83.240
13	1.123	0.025	96.371	71.578	82.067
14	1.142	0.023	67.660	67.386	67.522
15	1.323	0.025	97.333	60.204	74.330
16	1.283	0.032	64.975	50.639	56.942
17	1.230	0.029	92.351	54.547	68.434
18	1.143	0.029	82.636	44.896	58.023
19	1.281	0.034	58.459	38.613	56.503
20	1.220	0.059	30.589	17.644	22.412
21	1.256	0.040	47.787	45.133	46.526
22	1.369	0.034	68.723	40.220	50.778
23	1.225	0.020	201.642	53.866	84.881
24	1.211	0.041	54.560	23.209	32.597
25	1.264	0.030	60.390	52.464	56.158
Media	1.229	0.031	81.882	49.199	59.162
Coef. Variación	7.26 %	25.43 %	38.00 %	27.86 %	25.25 %

**Tabla 5.2** Resistencia a compresión simple ( $f_{ck}$ ), deformación de pico ( $\epsilon_k$ ) y módulo de elasticidad  $E_{medio}$ ,  $E_{1/3}$  y  $E_{2/3}$  obtenido para las probetas cúbicas ensayadas a compresión simple en dirección transversal. Edad: 6 meses.

Unidad	$f_{ck}$ (MPa)	$\epsilon_k$ (-)	$E_{medio}$ (MPa)	$E_{1/3}$ (MPa)	$E_{2/3}$ (MPa)
26	0.956	0.025	42.803	120.395	62.957
27	0.954	0.037	60.014	26.587	36.834
28	1.079	0.027	70.165	47.798	56.791
29	1.021	0.032	55.047	32.987	41.344
30	0.832	0.029	71.309	28.860	40.933
31	1.130	0.029	60.958	46.281	52.590
32	0.889	0.025	61.779	25.301	35.839
Media	0.980	0.029	60.297	46.887	46.755
Coef. Variación	10.65 %	14.47 %	15.95 %	71.80 %	22.74 %

**Tabla 5.3** Resistencia a compresión simple ( $f_{ck}$ ), deformación de pico ( $\epsilon_k$ ) y módulo de elasticidad  $E_{medio}$ ,  $E_{1/3}$  y  $E_{2/3}$  obtenido para las probetas cúbicas ensayadas a compresión simple en dirección longitudinal. Edad: 6 meses.

Unidad	$f_{ck}$ (MPa)	$\epsilon_k$ (-)	$E_{medio}$ (MPa)	$E_{1/3}$ (MPa)	$E_{2/3}$ (MPa)
33	1.215	0.066	27.734	18.003	21.830
34	1.101	0.046	43.614	25.271	31.997
35	1.075	0.070	19.576	16.308	17.792
36	1.159	0.073	29.071	16.742	21.323
37	1.386	0.053	50.791	31.888	39.104
38	1.252	0.060	37.220	22.260	27.798
39	0.755	0.052	24.485	14.894	18.556
Media	1.135	0.060	33.214	20.767	25.486
Coef. Variación	17.35 %	17.03 %	33.49 %	29.44 %	30.86 %





# Índice de Figuras

---

1.1	Zonas del planeta donde dominan las construcciones en adobe	2
1.2	Zigurat o pirámide de la antigua Mesopotamia. Irán	3
1.3	Alhambra de Granada. Andalucía. España	4
1.4	Kasbah. Rabat. Marruecos	4
1.5	Chan Chan. Perú	5
1.6	Dimensiones teóricas de una unidad de adobe en centímetros	7
2.1	Probeta en forma de murete	9
2.2	Probeta cúbica	10
2.3	Probeta cilíndrica	10
2.4	Caja de conexiones para los sensores LVDT	13
2.5	Útiles para el transporte de los muretes y su colocación en posición diagonal	14
2.6	Sistema de sujeción de los muretes	14
2.7	Labores de corte de los muros	15
2.8	Transporte con traspaleta manual	15
2.9	Colocación sobre la viga con ayuda de eslingas	16
2.10	Volteo sobre la viga para la colocación en posición diagonal	16
2.11	Aplicación de yeso es la base	17
2.12	Centrado de la viga con la ayuda de eslingas	17
2.13	Retirada de los restos del ensayo con ayuda de traspaleta manual	18
2.14	Sistema de colocación de los sensores al murete. Sensores LVDT, HBM, abrazaderas, pletinas y varillas	19
2.15	Zona de la varilla que trabaja en rango limada	19
2.16	Sistema para evitar que las varillas choquen en el muro	19
2.17	Caja de protección	20
2.18	Sistema de protección para los sensores	20
2.19	Protección para el potenciómetro	21
2.20	Útil aplicación de la carga en ensayos brasileños	21
2.21	Útil sobre el que se aplica la carga	22
2.22	Aplicación de yeso sobre la superficie de aplicación de la carga	22
3.1	Dimensiones de la probeta	26
3.2	Interpretación de la tensión de cortante sobre un murete	26
3.3	Pórtico de carga principal del laboratorio de Estructuras. Marca <i>Servosis</i>	28
3.4	Mesa de trabajo con todos los equipos conectados	28
3.5	Máquina universal de ensayos. Marca <i>Servosis</i>	29
3.6	Prensa hidráulica MES 300. Marca <i>Servosis</i>	30
3.7	Ensayo a compresión simple de la probeta cúbica L2-L4	31
3.8	Curvas tensión-deformación para los ensayos de probetas cúbicas. En color grisáceo se muestran los resultados experimentales para todas las probetas, en color negro la curva media para las probetas ensayadas en dirección transversal y en color rojo la curva media para las probetas ensayadas en dirección longitudinal	32

3.9	Valor de la deformación máxima alcanzada ( $\epsilon_k$ ) para cada probeta cúbica ensayada en dirección transversal. Edad: 1 año	32
3.10	Valor de la resistencia a compresión simple ( $f_{ck}$ ) alcanzada para cada probeta cúbica ensayada en dirección transversal. Edad: 1 año	32
3.11	Valor del módulo de elasticidad medio ( $E_{medio}$ ) alcanzado para cada probeta cúbica ensayada en dirección transversal. Edad: 1 año	33
3.12	Valor de la deformación máxima alcanzada ( $\epsilon_k$ ) para cada probeta cúbica ensayada en dirección longitudinal. Edad: 1 año	33
3.13	Valor de la resistencia a compresión simple ( $f_{ck}$ ) alcanzada para cada probeta cúbica ensayada en dirección longitudinal. Edad: 1 año	33
3.14	Valor del módulo de elasticidad medio ( $E_{medio}$ ) alcanzado para cada probeta cúbica ensayada en dirección longitudinal. Edad: 1 año	34
3.15	Ejecución del ensayo de tracción indirecta sobre la probeta cilíndrica P01S	35
3.16	Resistencia a la tracción para ensayos de tracción indirecta ( $f_{tk}$ ) para los cilindros grandes (diámetro 150 mm)	36
3.17	Resistencia a la tracción para ensayos de tracción indirecta ( $f_{tk}$ ) para los cilindros pequeños (diámetro 100 mm)	36
3.18	Ensayo de compresión diagonal sobre el muro M01	37
3.19	Curva tensión de cortante ( $\tau$ )-deformación ( $\epsilon$ ) para el muro M02	38
3.20	Curva tensión de cortante ( $\tau$ )-deformación ( $\epsilon$ ) para el muro M03	38
3.21	Curva tensión de cortante ( $\tau$ )-deformación ( $\epsilon$ ) para el muro M04	38
3.22	Curva tensión de cortante ( $\tau$ )-deformación ( $\epsilon$ ) para el muro M05	39
3.23	Curva tensión de cortante ( $\tau$ )-deformación ( $\epsilon$ ) para el muro M06	39
3.24	Módulo de rigidez medio ( $G_{medio}$ ), en color rojo, sobre las curvas de tensión de cortante ( $\tau$ )-deformación de cortante ( $\gamma$ ) seleccionadas, en color grisáceo	40
3.25	Resistencia a la compresión diagonal ( $\tau_{max}$ ) para los muretes M02, M04, M05 y M06 respectivamente	41
3.26	Deformación de cortante pico ( $\gamma_k$ ) para los muretes según los pares de sensores seleccionados	41
3.27	Módulo de rigidez $G_{medio}$ para los muretes según los pares de sensores seleccionados	42
4.1	Valor de la resistencia a compresión simple ( $f_{ck}$ ) para todas las probetas cúbicas ensayadas a compresión simple en campañas anteriores. Color azul: Posición transversal, 1 mes. Color rojo: Posición transversal, 6 meses. Color verde: Posición longitudinal, 6 meses. Color celeste: Posición transversal, 1 año. Color magenta: Posición longitudinal, 1 año	44
4.2	Valor de la deformación pico ( $\epsilon_k$ ) para todas las probetas cúbicas ensayadas a compresión simple en campañas anteriores. Color azul: Posición transversal, 1 mes. Color rojo: Posición transversal, 6 meses. Color verde: Posición longitudinal, 6 meses. Color celeste: Posición transversal, 1 año. Color magenta: Posición longitudinal, 1 año	45
4.3	Valor del módulo de elasticidad ( $E_{medio}$ ) para todas las probetas cúbicas ensayadas a compresión simple en campañas anteriores. Color azul: Posición transversal, 1 mes. Color rojo: Posición transversal, 6 meses. Color verde: Posición longitudinal, 6 meses. Color celeste: Posición transversal, 1 año. Color magenta: Posición longitudinal, 1 año	45
4.4	Módulo de elasticidad medio ( $E_{medio}$ ), tangente a 1/3 ( $E_{1/3}$ ) y tangente a 2/3 ( $E_{2/3}$ ) representado en color negro sobre las curvas tensión-deformación de los ensayos de probetas cúbicas en color grisáceo. Edad: 1 año	46
4.5	Fractura de la probeta cúbica L2-L4 con aplicación de la carga en dirección longitudinal	46
4.6	Fractura de la L2-T5 probeta cúbica con aplicación de la carga en dirección transversal	47
4.7	Curvas fuerza-desplazamiento para las probetas cilíndricas en ensayos de tracción indirecta	47
4.8	Fractura de una rotura a tracción limpia en un ensayo de tracción indirecta	48
4.9	Extensión de la fractura a lo largo de la probeta cilíndrica	48
4.10	Detalle de la curva tensión de cortante ( $\tau$ ) frente a deformación ( $\epsilon$ ) para el muro M02. La curva completa puede apreciarse en la figura 3.20	49
4.11	Fractura del ensayo de compresión diagonal para el muro M01	50
4.12	Fractura del ensayo de compresión diagonal para el muro M05	50
4.13	Avance de la fractura durante el ensayo del muro M02	51
4.14	Avance de la fractura durante el ensayo del muro M03	52
4.15	Avance de la fractura durante el ensayo del muro M04	53
4.16	Avance de la fractura durante el ensayo del muro M05	54

4.17	Avance de la fractura durante el ensayo del muro M06	55
------	--	----



# Índice de Tablas

2.1	Inventario de sensores utilizados durante la campaña de ensayos	11
2.2	Valores de calibración para el sensor LVDT <i>Sangamo</i>	12
2.3	Recta de regresión obtenida	12
2.4	Posición de los sensores sobre las caras del muretes	13
3.1	Características de las probetas cúbicas ensayadas. Edad, lote de material al que pertenecen, características geométricas o tipo de control que se utilizó durante el ensayo (fuerza o desplazamiento)	30
3.2	Características de los cilindros ensayados mediante ensayos de tracción indirecta. Edad de las probetas, lote del material, geometría y tipo de control para la aplicación de la carga, ya sea en fuerza (F) o en desplazamientos (D)	34
3.3	Características de los muretes ensayados. Edad, lote de material, dimensiones geométricas y control de la carga, ya sea en fuerza (F) o desplazamientos (D).	37
3.4	Pares de sensores de cara murete seleccionados para ser representados	40
4.1	Resistencia a compresión simple, deformación de pico y módulo de elasticidad obtenido para las probetas cúbicas en dirección transversal. Edad: 1 año. Unidades ensayadas: 5	56
4.2	Resistencia a compresión simple, deformación de pico y módulo de elasticidad obtenido para las probetas cúbicas en dirección longitudinal. Edad: 1 año. Unidades ensayadas: 5	56
4.3	Resistencia a compresión simple, deformación de pico y módulo de elasticidad obtenido para las probetas cúbicas en dirección transversal. Edad: 6 meses. Unidades ensayadas: 7	56
4.4	Resistencia a compresión simple, deformación de pico y módulo de elasticidad obtenido para las probetas cúbicas en dirección longitudinal. Edad: 6 meses. Unidades ensayadas: 7	57
4.5	Resistencia a compresión simple, deformación de pico y módulo de elasticidad obtenido para las probetas cúbicas en dirección transversal. Edad: 1 mes. Unidades ensayadas: 25	57
4.6	Resistencia a la tracción característica para los ensayos de tracción indirecta en probetas cilíndricas grandes (diámetro 150 mm)	58
4.7	Resistencia a la tracción característica para los ensayos de tracción indirecta en probetas cilíndricas pequeñas (diámetro 100 mm)	58
4.8	Resistencia a la compresión diagonal $\tau_{max}$ , deformación de cortante pico $\gamma_k$ , módulo de rigidez $G_{medio}$ y tensión de tracción indirecta $\sigma_I$ para los pares de sensores seleccionados en los muretes ensayados a compresión simple	59
4.9	Resistencia a compresión simple ( $f_{ck}$ ), módulo de rigidez ( $G_{medio}$ ) y tensión de cortante ( $\tau$ ) obtenidos por distintos autores [20]	60
5.1	Resistencia a compresión simple ( $f_{ck}$ ), deformación de pico ( $\epsilon_k$ ) y módulo de elasticidad $E_{medio}$ , $E_{1/3}$ y $E_{2/3}$ obtenido para las probetas cúbicas ensayadas a compresión simple en dirección transversal. Edad: 1 mes	76
5.2	Resistencia a compresión simple ( $f_{ck}$ ), deformación de pico ( $\epsilon_k$ ) y módulo de elasticidad $E_{medio}$ , $E_{1/3}$ y $E_{2/3}$ obtenido para las probetas cúbicas ensayadas a compresión simple en dirección transversal. Edad: 6 meses	77

- 5.3 Resistencia a compresión simple ( $f_{ck}$ ), deformación de pico ( $\epsilon_k$ ) y módulo de elasticidad  $E_{medio}$ ,  $E_{1/3}$  y  $E_{2/3}$  obtenido para las probetas cúbicas ensayadas a compresión simple en dirección longitudinal. Edad: 6 meses



# Bibliografía

---

- [1] *Normativa peruana NTE E.080 diseño y construcción con tierra reforzada*, 2007.
- [2] UNE 103101, *Análisis granulométrico de suelos por tamizado*, 1995.
- [3] UNE 103103, *Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande.*, 1995.
- [4] UNE 103104, *Determinación del límite plástico de un suelo*, 1993.
- [5] Norma Internacional ISO 1920-4:2005, *Testing of concrete: Strength of hardened concrete*, 2005.
- [6] M.J. Guinea Díaz. Monografía No. 385/386. Instituto Eduardo Torroja. 1987, *La tierra, material resistente al agua.*, 1987.
- [7] UNE-EN 12390-6 2010, *Ensayos de hormigón endurecido: Resistencia a tracción indirecta de probetas*, 2010.
- [8] UNE-EN 772-1:2011, *Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. parte 1: Determinación de la resistencia a compresión*, 2011.
- [9] Sergio Lagomarsino Stefano Podesta Anna Brignola, Sara Frumento, *Identification of shear parameters of masonry panels through the in-situ diagonal compression test*, 2011.
- [10] M. Blondet, *Seismic resistant earthen construction: the contemporary experience at the Pontificia Universidad Católica del Perú*, 2011.
- [11] Norma Internacional ASTM C496-04, *Determinación de la resistencia a tracción indirecta de especímenes cilíndricos de concreto*, 2004.
- [12] Ana Alba Cruz. Proyecto Fin de Carrera., *Influencia del tiempo de exposición a altas temperaturas sobre el comportamiento en fractura de H.A.C. de alta resistencia reforzados con fibras*, 2015.
- [13] Sergio Astorga Pantoja. Proyecto Fin de Carrera. 2011, *Análisis del comportamiento de muros de adobe reforzados con geomalla ante esfuerzos cíclicos*.
- [14] Miguel Romero Sempere. Proyecto Fin de Carrera. 2013, *Análisis numérico y experimental del comportamiento de muros de adobe reforzados con geomalla*.
- [15] Javier Gómez Bermudo. Trabajo Fin de Grado. 2016. *Caracterización experimental del comportamiento del adobe frente a cargas de compresión simple*.
- [16] J. Dethier, *Down to earth: Adobe architecture*, 1983.
- [17] M.A. Rodriguez Diaz and B. Saroza Horta., *Identificación de la composición óptima del adobe como material de construcción de una escuela en Cuba*, 2005.
- [18] Aníbal Costa Dora Silveira, Humberto Varum and José Carvalho, *Mechanical properties and behaviour of traditional adobe wall panels of the aveiro district*, 2014.

- [19] Normativa Internacional ASTM E519, *Standard test method for diagonal tension (shear) in masonry assemblages*, 1ª ed., 2002.
- [20] Patrick Fontana Lorenzo Miccoli, Urs Müller, *Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob*, 2014.
- [21] Norma RILEM TC-76 LUM, *Diagonal tensile strength tests of small wall specimens*, 1991.
- [22] Afsin Saritas Lutfullah Turanli, *Strengthening the structural behavior of adobe walls through the use of plaster reinforcement mesh*, 2010.
- [23] U. Tejada Schmidt, *Técnicas de preparación y estabilización del adobe*.
- [24] NNMX-C-464-ONNCCE *Determinación de la resistencia a compresión diagonal y de la rigidez a cortante de muretes de mampostería de barro y de concreto*.